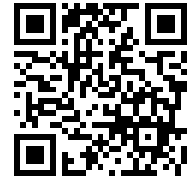
This is a reproduction of a library book that was digitized by Google as part of an ongoing effort to preserve the information in books and make it universally accessible.

Google™ books

https://books.google.com



Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

NYPL RESEARCH LIBRARIES
3 3433 08403400 2

Digitized by Google

Digitized by Google

PAB
ha Co

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Die Physik

auf

Grund ihrer geschichtlichen Entwickelung

für

weitere Kreise in Wort und Bild dargestellt

Erster Band

Digitized by Google

Digitized by Google

Die Physik

auf

Grund ihrer geschichtlichen Entwickelung

für

weitere Kreise in Wort und Bild dargestellt

von

Paul La Cour und **Jakob Appel**

Autorisierte Übersetzung

von

G. Siebert

Erster Band

Mit 419 in den Text eingedruckten Abbildungen
und zwei Tafeln

Braunschweig
Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn
1905

SG

Digitized by Google

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
534373
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS.
R 1912 L

Digitized by Google

Vorwort.

Um die Lehren einer Wissenschaft in möglichst knapper Form zusammenzustellen, verfährt man in der Regel systematisch, d. h. man stellt die allgemeinen Gesetze an die Spitze und läßt einige Beispiele folgen, die geeignet sind, diese Gesetze zu erläutern und zu bestätigen. Zur Erkenntnis dieser Gesetze ist man aber im allgemeinen auf dem entgegengesetzten Wege gekommen. Zuerst hat man einzelne Erfahrungen gemacht und dann erst den inneren Zusammenhang derselben erkannt.

Ein Lehrgang der ersteren Art führt in der Regel schneller zum Ziel, dagegen hat ein Lehrgang, der soweit wie möglich den Weg der Erfahrung geht, ohne Zweifel den Vorzug größerer Gründlichkeit.

Wenn es sich nun um Naturwissenschaft handelt, so werden diejenigen, welche die erfahrungsgemäße Methode zu schätzen wissen, entweder an bekannte Erscheinungen erinnern oder weniger bekannte den Schülern vorführen, bevor das Naturgesetz ausgesprochen wird. Hierdurch erreicht man es allerdings zuweilen, den Zuhörer in eine gewisse Spannung zu versetzen und für die Erklärung empfänglich zu machen, die er jetzt erwartet, die ihn aber vielleicht gar nicht interessieren würde, wenn sie ihm gegeben würde, ohne daß er darauf vorbereitet worden ist. Allein eine oder zwei Tatsachen sind in der Regel nicht hinreichend, um den Zuhörer den Wert und die Tragweite des Gesetzes erkennen zu lassen und ihn in die nötige Spannung zu versetzen.

Führt man dagegen den Zuhörer den Weg, den man eingeschlagen hat, um das Gesetz zu finden, so daß er dieses Gesetz sozusagen selbst von neuem auffindet, dann wird das Gefundene in ganz anderer Weise sein geistiges Eigentum, als wenn es ihm im fertigen Zustande geboten wird.

Das einzige, was sich gegen eine solche Methode einwenden läßt, ist, daß sie mehr Zeit erfordert als die systematische. Allein dieser Einwand hat auf dem Gebiete der allgemeinen Bildung, auf dem er allerdings am meisten gemacht wird, durchaus keine Berechtigung.

Digitized by Google

Einer, der sich mit den Elementen der Naturlehre — oder der Mathematik — vertraut gemacht hat, erweitert seine Kenntnisse vielleicht am schnellsten auf systematischem Wege. Allein weshalb zeigen die meisten, die sich einige allgemeine Kenntnisse in der Physik erworben haben, so wenig Verständnis für die Naturerscheinungen, wenn sie diesen im Leben begegnen? Einfach deshalb, weil sie die Naturgesetze, über die sie vielleicht manches gehört und gelesen haben, nicht auf dem naturgemäßen Wege kennen gelernt haben.

Es ist daher für die meisten sicher keine Zeitverschwendung, wenn sie mit der nötigen Ruhe an die Arbeit gehen. Wer sich mit einigen wenigen Naturerscheinungen gründlich bekannt gemacht hat, ist für das weitere Studium besser vorbereitet als derjenige, der sich ein langes Register von Sätzen mechanisch eingeprägt hat, ohne sie gründlich zu verarbeiten.

Vor allen Dingen sollten die Lehrer darauf bedacht sein, im Unterricht mit der nötigen Ruhe fortzuschreiten, um nicht den Schülern die Freude an dem Gegenstande zu verderben und den Erfolg des Unterrichts zu beeinträchtigen. Dadurch, daß die gewonnene Zeit auf Wiederholungen verwendet wird, wird der Schaden nicht gut gemacht, da die Wiederholungen doch gewöhnlich nur in einer gedächtnismäßigen Aneignung des Stoffes bestehen.

Nun ist nicht zu bezweifeln, daß mancher eifrige Lehrer sich Zeit nimmt und zahlreiche Beispiele aufsucht, um die richtige Empfänglichkeit hervorzurufen und die Schüler in die wünschenswerte Spannung zu versetzen. So anerkennenswert auch solche Bestrebungen sind, so sind es doch immer nur persönliche Bestrebungen. Eine allgemein gültige Methode wird auch nicht erzielt, wenn ein solcher Lehrer in einem Lehrbuch eine Unmasse von Beispielen zusammenstellt. Der Verfasser eines Lehrbuches kann es nun einmal auf diese Weise nicht erreichen, daß *seine* Methode von allen anderen Lehrern befolgt wird.

Es gibt nur *eine* Methode, deren Autorität von allen anerkannt werden sollte, nämlich diejenige, die nicht ein einzelner Verfasser, sondern das ganze Menschengeschlecht zuwegegebracht hat, die historische. Wenn es einem Verfasser oder Lehrer beim Befolgen dieser Methode hier und da nicht gelingen sollte, die Eroberungen des Menschengeschlechtes vollkommen zugänglich zu machen, so kann man sicher sein, daß dies nur an der betreffenden Person liegt und daß dieser Mangel beseitigt werden kann. Daß aber das Menschengeschlecht seine großen Fortschritte nicht auf einem unnatürlichen Wege gemacht hat, und daß die jetzt lebende Generation das Erbe der Vergangenheit nicht besser antreten kann, als daß sie es historisch von denjenigen entgegennimmt, die es hinterlassen haben, ist ebenso gewiß, wie wir verpflichtet sind,

Digitized by Google

die großen Namen zu kennen, von denen die Geschichte der Physik berichtet. — Das vorliegende Buch ist streng genommen keine Geschichte der Physik, es ist ein Versuch, den Anfänger in die Physik auf einem Wege einzuführen, der von der geschichtlichen Entwickelung der Wissenschaft vorgezeichnet ist, und die Verfasser geben sich der Hoffnung hin, daß es ihnen geglückt ist, das Ziel auf dem richtigen Wege erreicht zu haben.

Der historische Hintergrund, an den sich die Darstellung anlehnt, wird im allgemeinen als bekannt vorausgesetzt. Der Unterricht in der allgemeinen Weltgeschichte erhält durch die historische Einführung in die Physik eine erwünschte Ergänzung, die bis jetzt nicht die gebührende Beachtung gefunden hat, trotzdem das Verhältnis des Menschen zu den Naturkräften in der Geschichte und im Kulturleben eine wichtige Rolle gespielt hat. Hauptsächlich ist es aber der Unterricht in der Physik selbst, der hiermit die naturgemäße pädagogische Grundlage erhält, und das vorliegende Buch mag daher im wesentlichen als ein Lehrbuch der Physik betrachtet und benutzt werden.

Wenn es auch von anderer Form ist als die systematischen Lehrbücher der Physik im allgemeinen, so wird man in ihm doch vielleicht diejenige Systematik finden, die für jeden Unterricht gefordert werden muß.

Digitized by Google

Vorwort des Übersetzers.

Es fehlt in der deutschen wissenschaftlichen Literatur nicht an Darstellungen der Geschichte der Physik, noch weniger an großen und kleinen Lehrbüchern der Physik; aber es gibt in deutscher Sprache kein Werk, welches zugleich eine reich illustrierte Geschichte der Physik und ein reich illustriertes Lehrbuch der Physik ist. Ein solches Buch ist die „Historische Physik" von La Cour und Appel. Sie ist ein Lehrbuch der Physik, welches nicht nur den heutigen Zustand der Wissenschaft darstellt, sondern auch in erzählender Weise die Forschungsarbeit schildert, durch die im Laufe der Jahrhunderte dieser Zustand erreicht worden ist. Nicht nur im Text, sondern auch in den zahlreichen Illustrationen kommt der historische Charakter des Werkes zum Ausdruck. Da das Buch interessant und anregend und in leicht verständlicher Sprache geschrieben ist, so dürfte gewiß allen Freunden der Physik eine deutsche Übersetzung des in dänischer Sprache erschienenen Originals willkommen sein.

Wiesbaden, im Juni 1905.

G. Siebert.

Digitized by Google

Inhalt.

§§ 1 — 74. **Das Weltgebäude; bis 1630.** Seite

Die ältesten Kulturvölker 3
Die Griechen 20
Die Araber 50
Das Erwachen der Astronomie in Westeuropa 52

§§ 75 — 111. **Das Licht.**

Von den ältesten Zeiten bis Newton 81

§§ 112 — 270. **Die Kraft.**

Gleichgewicht fester Körper 123
Bewegung 163
Andere krummlinige Bewegungen 181
Das Parallelogramm der Kräfte 189
Der Stoß 193
Energie 197
Flüssigkeiten 198
Wasser- und Luftkunst 219
Das Luftmeer 243

§§ 271 — 333. **Das Weltgebäude; nach 1630.**

Die Erdkugel 283
Die Geschwindigkeit des Lichtes 291
Isaak Newton 305
Die Fixsterne 347

§§ 334 — 377. **Der Schall.**

Der Schall 365

§§ 378 — 420. **Die Natur des Lichtes.**

Die Farben 417

§§ 421 — 441. **Die Spektralanalyse.**

Die Spektralanalyse 465

Alphabetisches Register 491

Digitized by Google

Systematische Übersicht über den Inhalt des ersten Teils.

(Die Zahlen geben die Seitenzahlen an.)

Das Weltgebäude.

Hilfsmittel: Mathematik 5, 14, 21, 22, 55, 132—134, 220, 308, 313, 317—318; Observatorien 4, 67—68, 72, 295, 297; Instrumente 4, 12, 14, 27, 32, 33, 36, 57, 64, 70, 71, 112, 284, 285, 308, 318, 357; Globus 8, 27; Sternkarten 5; Abstandsmessung 21, 29—32, 45, 328—331, 355—359; Meter und Gramm 128—129, 290; Kartenzeichnen 41—45.

Astrologie: Wahrsagen 3, 64, 77.

Die Erdkugel: Alte Ansichten 22, 24; Kugelgestalt 22—25, 56—58; Breite und Länge 39—41; Messung der Erde 26—28, 45, 52, 283—288; Triangulierung 283; Gestalt der Erde (Gradmessung) 283—290; Bewegungen der Erde 27—29, 45, 55, 314, 317; Präzession 36—39, 341—344; Zentrifugalkraft am Äquator 287; Gewicht der Erde 323—326, 341; Schwere 341; Entfernung der Erde von der Sonne 30—31, 45, 329—331; Ebbe und Flut 343—345; atmosphärische Strahlenbrechung 46—48.

Die Sonne: Weg der Sonne am Himmel 7; Sonnenwende, Tag- und Nachtgleiche 8, 12; Ekliptik 8—9; Widderpunkt 9, 36—38; Schiefe der Ekliptik 14, 15; Ort der Sonne in der Ekliptik 35, 55; Umlaufszeit 13, 36, 37; Sonnenuhr 36; Entfernung der Sonne von der Erde 30—31, 45, 329—331; Größe der Sonne 31, 87, 331; Masse der Sonne 322—324, 331; Sonnenfinsternisse 20, 24; Sonnenflecken 159, 331, 483; Sonnenfackeln 483; Protuberanzen 486, 488; Beschaffenheit der Sonne 477, 483.

Der Mond: Weg des Mondes am Himmel 7; Umlaufszeit 9, Mondwechsel 9, Mondbahn 9, 60, 310, 323; Mondfinsternisse 20, 24, 46; Aussehen des Mondes 156, 333; Masse des Mondes 323; Ebbe und Flut 343—345.

Die Planeten: Scheinbare Bewegung 10, 55, 60—62; wirkliche Bewegung 75; Entfernung von der Sonne 74, 328—331, 389; Rotationsdauer 331, 345; Venusdurchgang 329; Masse 323, 331; Perturbationen 327—328; Phasen der Venus 159; Umdrehungszeit 331; Mars 158, 332, 334—336; Jupitermonde 156, 293—294; Saturn 158, 176, 331—333, 349; Uranus 331, 348; Neptun 327—328; Spektrum der Planeten 489.

Die Kometen: 11, 338—341, 489.

Die Fixsterne: Sternhimmel 5, 349; Gesichtskreis 6; Zenit und Nadir 14; Weltpole 6; Orientierung 11, 12; Sternkarten 5; Sternbilder 6; Sternkataloge 33, 48; Drehung des Fixsternhimmels 6, 25; Tagbogen und Nachtbogen 6; Bestimmung des Sternortes 13; mit dem Meridiankreis 32—34, 68—70;

Digitized by Google

atmosphärische Strahlenbrechung 46, 47; Parallaxe 30, 71, 295—297, 351, 359; Aberration 343; Eigenbewegung 349—350, 360; Entfernung 351—360; Größe 351, 361; Doppelsterne 352; Sternhaufen und Nebelflecke 354; Milchstraße 157, 353—354; veränderliche Sterne 65; farbige Sterne 353; unsichtbare Sterne 353, 361; Spektra der Fixsterne 488.

Die Zeit: Zeiteinteilung 4; Sonnentag und Sterntag 35; Sonnenuhr 36; Zeitgleichung 35; Einheitszeit 41; Länge des Jahres 12, 36; Kalender 15—18, 55, 86, 295; die Monate 16—20; die Woche 19.

Systeme und Gesetze: Alte Systeme 22—24; Aristarch 27—29; Theorie der Epicykel 49; Ptolemäisches System 48—50; Kopernikanisches System 60—62, 160; Tychonisches System 71; die Keplerschen Gesetze 75—76; Newtonsches Anziehungsgesetz 309—329.

Das Licht.

Geradlinige Fortpflanzung: Das Gesetz 81; Richtung der Strahlen 84, 443; Perspektive 82; Schatten 83, 94; Dunkelkammer 85, 107—109; Abstandsgesetz 88; Photometrie 89.

Spiegelung: Das Gesetz 90—92, 440, 445; kürzester Weg 92; optische Täuschungen 93—94; Kaleidoskop 94; Hohlspiegel 95—100; Konvexspiegel 100; vollständige Zurückwerfung 114.

Brechung: Das Gesetz 47, 101, 113—114, 440, 445; Glasplatten 103; das Prisma 103; Sammellinse 104—106; Zerstreuungslinse 106; Dunkelkammer mit Linse 108; Laterna magica 109; Fernrohr 110; Vergrößerungsglas 101, 106; Mikroskop 111; Brillen 116.

Doppelbrechung: 437—438, 453, 459; Nicolsches Prisma 461.

Das Auge: Das Auge ist eine Dunkelkammer 116; Eigenschaften des Auges 116—119, 424; Stereoskop 119; Augenspiegel 393; Farbenempfindung 434—435; Nachbild im Auge 435.

Die Farben: Die prismatischen Farben 417; Newtons Spektrum 419, 465; weißes Licht enthält alle Farben 419—423; achromatische Linse 424—425; Regenbogen 426—430; Farben der Gegenstände 431, 447; Fluoreszenz 433; Grundfarben, komplementäre Farben, Kontrastfarben 434—435; Newtonsche Farbenringe 441, 448; Interferenzfarben 435, 451.

Lichttheorien: Demokrits Theorie 439; Newtons Emissionstheorie 439—442, 446; Grimaldis Versuch 435—436; Hookes Wellentheorie 436; Huygens' Wellentheorie 443—445; Interferenz 451, 456—458, 470—472; Wellenlängen 451; der Äther 443, 458—461; Licht und Magnetismus 462.

Polarisation: Polarisiertes Licht 452; Polarisationswinkel 456; Schwingungen des polarisierten Lichtes 459; Drehung der Polarisationsebene 461.

Spektralanalyse: Das reine Spektrum 465; Fraunhofersche Linien 466, 468—469, 476, 482, 486; Spektroskop 478—480, 482; Gitterspektroskop 481; Spektrallinien 473, 476—482, 486—488; Ursache der Fraunhoferschen Linien 476—478, 483; Metallspektra 480; Wasserstoffspektrum 481; verschiedene Typen der Spektra 481; Sternspektra 488; Spektra der Planeten und Kometen 489.

Digitized by Google

Die Kraft.

Gleichgewicht fester Körper: Hebel 123, 133—135; statisches Moment 143; Schwerpunkt 135—141; Schnellwage 127; stabiles, labiles und indifferentes Gleichgewicht 140; Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten 146; Robervalsche Wage 147; Rolle und Flaschenzug 130—145; andere mechanische Potenzen 131, 146—150; Gleichgewicht auf der schiefen Ebene 151.

Bewegung: Trägheitsgesetz 163; Zusammensetzung der Bewegungen und der Kräfte 164, 182, 189—192; freier Fall 155, 164—166; vertikaler Wurf 167; Fall auf der schiefen Ebene 167—169, 187—192; Pendel 153, 169—171, 177—179; Wasseruhren und Sanduhren 171—173; alte Gewichtsuhren 174; Pendeluhr 177; Cykloidenpendel 179; Uhr mit Unruhe 179; Wurfbewegung 182—184; Zentrifugalkraft 185—188; der Stoß 193—196; Energie 197; Kraftmaschinen und Arbeitsmaschinen 234; Wassermühlen und Windmühlen 232—242.

Gleichgewicht der Flüssigkeiten: Druck in Flüssigkeiten 203, 207—213; hydraulische Presse 213; Gewichtsverlust im Wasser 203—204, 213—215; Auftrieb 205; schwimmende Körper 199, 205—206; kommunizierende Röhren 206—207; spezifisches Gewicht 202, 213—219; Aräometer 216; Schöpfwerke 199; Ventil und Hahn 228—229; Windmühlen und Wassermühlen 232—242; Ausströmen der Flüssigkeiten 248.

Die Luft: Der leere Raum 221—223, 244—247, 251, 256—260, 263, 265; die Luft 221, 243; Gewicht der Luft 261, 271; Ausdehnung der Luft 243—245, 263, 267; Zusammendrückung der Luft 243, 266; Boylesches Gesetz 266—269; Barometer 247—248; Luftdruck 247, 253, 258, 266; das Luftmeer 247, 251, 269; barometrische Höhenmessung 269—271; der Heber 223—224, 226, 252; Stechheber 226; Herons Spritzkugel 229; Mariottesche Flasche 272; Feuerspritze 230; Druckpumpe 268; Saugpumpe 270; Verdünnungspumpe 255—265; Verdichtungspumpe 272—277; Luft in Flüssigkeiten 263; Luftdruckmotoren 273; Taucherglocke 274; Luftschiffahrt 277—280; Segelschiff 242; Windmühle 236, 241.

Der Schall.

Der Schall: Töne durch Schwingungen erzeugt 367; Tonhöhe 368; Saitenschwingungen 368, 390; Stöße 369; absolute Schwingungszahl 369; Tartinische Töne 370; Fortpflanzung der Wasserwellen 371; Fortpflanzung des Schalles 370; Fortpflanzung der Luftwellen 377; Geschwindigkeit des Schalles in der Luft 377—379, in anderen Stoffen 379—381; Form der Luftwellen 382; Einfluß des Windes 382; Zurückwerfung und Brechung der Schallwellen 383—385; Zusammensetzung der Schallwellen 386; Interferenz der Schallwellen 387; sympathische Töne 388; Grundton und Obertöne 390; Klangfiguren 391—392; Resonatoren 397; Pfeifen 365, 367, 395, 404; Wohlklang 367—400; Intervalle 398—402; Lissajous Figuren 400—402; Sirene 403; Stimme 405; Vokale 406—408; Konsonanten 408—409; Phonograph 410; Ohr 411—414.

Digitized by Google

Das Weltgebäude.

Erkenntnisse und Entdeckungen bis 1630.

Digitized by Google

Digitized by Google

Die ältesten Kulturvölker.

§ 1. Auf den ausgedehnten Ebenen unter milden Himmelsstrichen, wo der Boden durch die großen Flüsse und deren Überschwemmungen fruchtbar gemacht wird, erreichte das Menschengeschlecht frühzeitig eine Stufe der Entwickelung und der gesellschaftlichen Zustände, die es in den Stand setzte, höhere Interessen zu pflegen und einen dem Menschen angeborenen Drang zu befriedigen, den Drang, sich mit Dingen zu beschäftigen, die anscheinend außerhalb des Bereiches der materiellen Bedürfnisse liegen. Es hat sich aber oft gezeigt, daß die Betätigung dieses Dranges sicherer zur Befriedigung dieser Bedürfnisse führt, als die unmittelbar auf dieses Ziel gerichtete Tätigkeit.

Die Ägypter am Nil, die Chaldäer am Euphrat und Tigris, die Inder am Indus, Ganges und Bramaputra und die Chinesen am Hoangho und Jangtsekiang lebten unter so günstigen Verhältnissen, daß sie ihre Tätigkeit noch manchen anderen Dingen als nur der Ernährung und der Kriegführung zuwenden konnten. Überall bei diesen Völkern treffen wir eine Klasse von Menschen, die man als die Priesterschaft zu bezeichnen pflegt und deren Kräfte besonderen Beschäftigungen gewidmet waren. Zu diesen gehörten selbstverständlich religiöse Pflichten, aber außerdem auch viele andere Tätigkeiten, die heutzutage von den Ärzten, den Richtern, den Schriftstellern, den Baumeistern u. s. w. ausgeübt werden. Man war in jenen Zeiten sehr konservativ beanlagt, denn die Ausübung der genannten Tätigkeiten vollzog sich gewöhnlich nach einmal angenommenen Vorschriften, deren Befolgung eine heilige Pflicht war, selbst wenn es sich um ganz äußerliche Dinge, wie die Form der Gebäude u. dgl. handelte. Der Fortschritt konnte daher nur ein langsamer sein, aber das einmal Gewonnene wurde um so besser eingeübt und erprobt.

Man sollte nun denken, daß sich diese Priesterschaften auch damit beschäftigt hätten, einen tieferen Zusammenhang in der Natur zu finden als den, der sich unmittelbar auf der Oberfläche zeigt. Die Völker des Altertums ahnten allerdings einen solchen Zusammenhang, allein sie machten sich eine ganz falsche Vorstellung von demselben. So glaubten sie, daß die Naturerscheinungen dazu bestimmt seien, über die Zukunft Aufschluß zu geben. Sie wahrsagten aus der Beobachtung der Eingeweide der Opfertiere, aus dem Fluge der Vögel, aus dem Zuge der Wolken, aus der Formveränderung von Sandfiguren, die eintrat, wenn man gegen ein Brett stieß, auf dem sie aufgezeichnet waren, u. s. w. Reste von derartigem Aberglauben haben sich bis

Digitized by Google

auf unsere Zeit erhalten. So soll die Farbe des Brustbeins der Gans, je nachdem sie hell oder dunkel ist, auf einen schneereichen oder schneearmen Winter schließen lassen, u. dgl. m.

Nicht viel anders verhält es sich mit der Art und Weise, wie man den Gang und das Aussehen der Gestirne zu deuten suchte. Aus den Sternen zu wahrsagen, namentlich einem das Horoskop oder die Nativität zu stellen, d. h. sein Schicksal aus der Stellung der Gestirne im Augenblicke seiner Geburt zu erkennen, war nicht nur im Altertum ein Hauptzweig der Sternkunde, sondern war es bis weit in die neuere Zeit hinein und ist es in manchen Gegenden, z. B. in China, noch jetzt.

Obwohl diese Wahrsagungen ebensowenig Wert haben wie jene, so bilden diese Bestrebungen doch gewissermaßen den Ausgangspunkt oder die Vorbereitung für die eigentliche Naturforschung. Man beobachtete nämlich den Gang der Gestirne mit religiöser Gewissenhaftigkeit.

Die Bedingungen für diese Beobachtungen waren bei den genannten Völkern besonders günstig. In ihren Ländern strahlt der Sternhimmel mit einer Klarheit und Schönheit, die man bei unserer mehr oder weniger nebeligen Luft und bei unseren allzu hellen Sommernächten nicht kennt. Der Nachthimmel ist in jenen Ländern immer hinreichend dunkel und die Nachtluft dabei doch mild und für längeren Aufenthalt unter freiem Himmel erträglich. Ebenso ist der Gesichtskreis in den großen Ebenen in der Regel frei.

Dazu kommt, daß man unter geordneten gesellschaftlichen Zuständen das Bedürfnis nach einer geregelten Zeiteinteilung empfand und daß man alsbald erkannte, daß die in regelmäßigem Wechsel verlaufenden Himmelserscheinungen am besten dazu zu brauchen waren.

Dies alles hatte zur Folge, daß man die Stellung und den Gang der Gestirne so genau als möglich zu beobachten, zu messen und anzugeben suchte. Man verfertigte Instrumente, oft in Form ungeheurer Bauten mit Visierlinien, man erfand Methoden und machte den Anfang mit der Mathematik, die erst von den Griechen vervollkommnet werden sollte und die zugleich mit den Meßapparaten die unentbehrliche Grundlage für jede Naturforschung bildet, die einen gewissen Grad von Vollkommenheit erreichen soll.

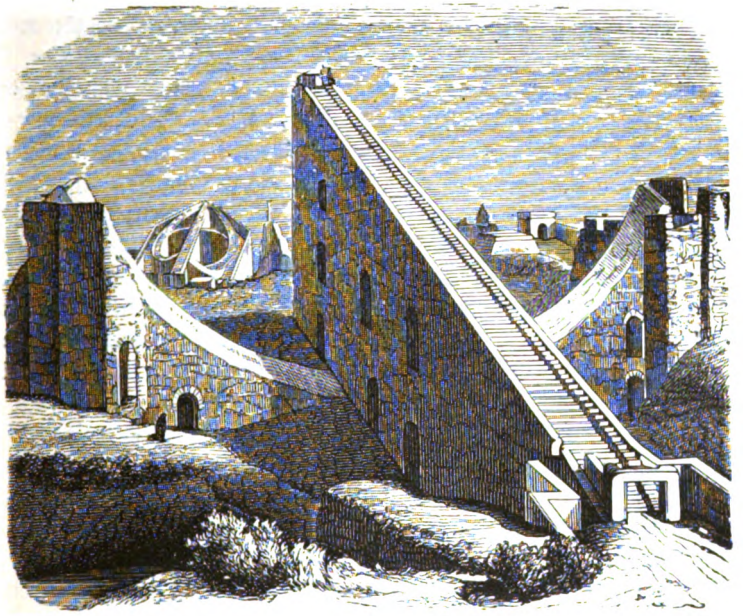
So ist der Sternhimmel der Erzieher des Menschengeschlechtes geworden. Wenn wir heute mit Dampf die großen Weltmeere und das Eisenbahnnetz der Erde befahren, wenn wir telegraphieren u. s. w., so geschieht dies auf Grund einer Kulturentwickelung, die sich bis auf die Sternbeobachtungen der Alten zurückverfolgen läßt. Wenn sie bei ihren Beobachtungen auch ganz andere Ziele verfolgten, so beweist diese Tatsache doch, daß der Drang, sich in Dinge zu vertiefen, deren unmittelbarer Nutzen nicht leicht zu erkennen ist, Achtung verdient. Man soll heute nicht geringschätzig auf die Beschäftigung der Alten herabsehen, vor allem nicht auf ihre Beschäftigung mit dem Sternhimmel, die nicht nur die Grundlage für unsere Herrschaft über die Naturkräfte geworden ist, sondern die auch an und für sich für uns etwas ebenso

Digitized by Google

Anziehendes ist wie für die Alten, für uns, die wir wissen, daß die Erde selbst nur ein unbedeutendes Glied des Weltalls ist.

§ 2. Wir wollen jetzt unsere Aufmerksamkeit zunächst dem Sternhimmel oder dem Firmament zuwenden, welches uns im wesentlichen denselben Anblick bietet wie anderen Völkern und wie auch den Alten. Wohin wir uns auch begeben mögen, überall und zu allen Zeiten tritt uns dieses unver-

Fig. 1.



Ein indisches Observatorium in Delhi.

änderliche Bild des Sternhimmels entgegen. Mit Hilfe der dem Buche beigefügten Sternkarte wird man sich leicht mit den wichtigsten Sternen bekannt machen können.

Bei einiger Aufmerksamkeit bemerkt man alsbald, daß die Sterne immer in derselben Stellung zueinander verharren, daß sie fix (fest) sind. Wohl jeder kennt die sieben Sterne, die den großen Bären oder Himmelswagen bilden, bestehend aus einem Viereck (den Rädern) und einem Bogen (der Deichsel).

Das Sternbild des großen Bären steht aber nicht immer an derselben Stelle des Himmels, sondern bewegt sich um einen Punkt am nördlichen Himmel, den sogenannten Weltpol, in dessen Nähe der Polarstern oder Nordstern steht (Fig. 6). Dieser befindet sich in einer durch die beiden Hinterräder des Wagens gezogenen Linie, und seine Entfernung vom Wagen ist ungefähr so groß wie die Länge des Wagens. Der Polarstern ist der äußerste

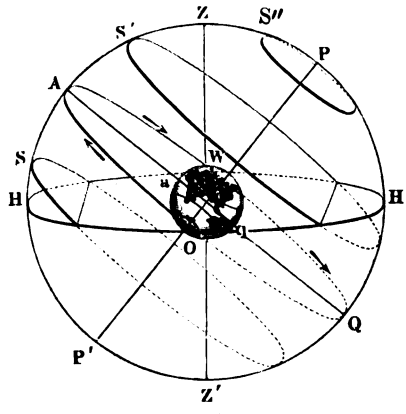
Digitized by Google

Stern in der Deichsel des kleinen Wagens oder des kleinen Bären. Auch dieses Sternbild besteht aus sieben Sternen, die ein Viereck und einen Bogen bilden.

Man wird nun bemerken, daß ebenso wie der Wagen auch alle anderen Sterne, ohne ihre gegenseitige Stellung zu ändern, sich im Laufe eines Tages um den Weltpol (Fig. 2) drehen.

Die Sterne, deren Abstand von diesem Pol kleiner ist als der Abstand PH' (Fig. 2) des Poles vom Gesichtskreis (Horizont) HH', gehen also niemals unter. Diese Sterne, z. B. S'', heißen Cirkumpolarsterne. Sterne, die etwas weiter vom Pol entfernt sind, z. B. S', gehen nur wenig unter den nördlichen Gesichtskreis. In einem Punkt zwischen Norden und Westen gehen sie unter und in einem Punkt zwischen Norden und Osten gehen sie auf. Die Zeit, während der sie unsichtbar sind, ist um so kürzer, je näher sie dem Pol sind, je weiter nach Norden sie also untergehen und aufgehen.

Fig. 2.



Die Drehung des Himmelsgewölbes.

Sterne, die so weit vom Nordpol entfernt sind, daß sie genau im Osten, O, aufgehen und im Westen, W, untergehen, sind zwölf Stunden am Himmel. Der Kreis, den ein solcher Stern beschreibt, heißt der Himmelsäquator, $OAWQ$.

Sterne, die vom Nordpol noch weiter entfernt sind, gehen zwischen Osten und Süden auf und zwischen Westen und Süden unter. Sie gehen am Himmel nur wenig in die Höhe, und wenn man den Himmel als eine große Kugelschale auffaßt, so stellt man sich einen stillstehenden Punkt vor, der ebenso tief unter dem südlichen Horizont liegt wie der Nordpol über dem nördlichen. Dieser Punkt P' heißt der Südpol des Himmels.

Der Weg eines Sternes am sichtbaren Himmel heißt sein Tagbogen, der übrige Teil sein Nachtbogen. Sterne am Äquator haben demnach einen Tagbogen von 12 Stunden. Bei den Sternen nördlich vom Äquator ist der Tagbogen größer, bei den Sternen südlich vom Äquator kleiner als 12 Stunden.

Die sogenannten Sternbilder, Figuren, welche die Phantasie der Alten um die verschiedenen Gruppen von Sternen gezeichnet hat, sowie die Namen, mit denen wir noch jetzt die Gruppen und auch einzelne Sterne bezeichnen, stammen meist aus Chaldäa, Ägypten und Griechenland. Es finden sich jedoch, namentlich auf demjenigen Teil des Himmels, der in der Nähe des Südpols liegt und den die Alten nicht kannten, mehrere moderne Namen, z. B. Luftpumpe und Elektrisiermaschine.

Digitized by Google

Wenn man die Sterne mit Hilfe der Sternkarte kennen lernen will, so kann man vom großen Bären oder vom Polarstern ausgehen. Hält man die Karte so, daß die Mitte den Polarstern deckt, und dreht sie so, daß das Bild des großen Bären nach der Seite hin fällt, wo man augenblicklich das Sternbild sieht, so gibt die Karte ein Bild vom übrigen Himmel. Später in der Nacht und um dieselbe Stunde später im Jahre gehen im Osten Sterne auf, die vorher unter dem Horizont waren, während andere im Westen unter dem Horizont versinken.

§ 3. Kennt man nun erst die Sterne und richtet dann seine Aufmerksamkeit auf diejenigen, unter denen an einem Abend der Mond steht, so wird man am nächsten Abend bemerken, daß der Mond zwar an der allgemeinen Bewegung von Osten nach Westen teilgenommen hat, daß er aber doch unter den Sternen ein gutes Stück nach Osten weitergegangen ist. Er ist also nicht fix, sondern er hat sich in der der allgemeinen Drehung entgegengesetzten Richtung bewegt. In ungefähr 28 Tagen macht der Mond in dieser Weise einen vollen Umlauf. Dies gab den Chinesen und den Indern Veranlassung, die Sterne in 28 Gruppen einzuteilen, so daß jede Gruppe von Pol zu Pol reichte und sich am Äquator über den achtundzwanzigsten Teil des Erdumfanges erstreckte. Diese Art der Einteilung der Fixsterne in sogenannte Mondhäuser haben wir nicht beibehalten.

Infolge dieser Wanderung in der Richtung nach Osten geht der Mond jeden Abend später auf.

§ 4. Die Sonne und die Sterne sind nicht gleichzeitig sichtbar, aber dennoch merkten es die Alten bald, daß die Sonne auch nicht fix ist. Sie bewegt sich ebenfalls unter den Fixsternen, und zwar auf demselben Wege wie der Mond, nur nicht so schnell. Sie braucht ein ganzes Jahr, um einen Umlauf zu machen.

Wenn nämlich ein Stern zu einer gewissen Zeit annähernd in derselben Richtung wie die Sonne gestanden, also mit dieser gleichzeitig aufgegangen und daher unsichtbar gewesen ist, so wird dieser Stern, während die Sonne weiter nach Osten fortschreitet, zu einer gewissen Stunde des Morgens am Osthimmel etwas vor Sonnenaufgang zum Vorschein kommen. Dies ist der sogenannte heliakische Aufgang (helios = Sonne) des Sternes. So bemerkten die alten Ägypter, daß Sirius, der schönste Fixstern des Himmels, der bei uns im Winter abends am südlichen Himmel sichtbar ist, damals einige Wochen vor dem Eintritt der Überschwemmung des Nils in der Morgendämmerung sichtbar wurde. Er erhielt daher nach dem wachsamen Hund den Namen Hundsstern. Ein anderes Sternbild in seiner Nähe bekam den Namen kleiner Hund.

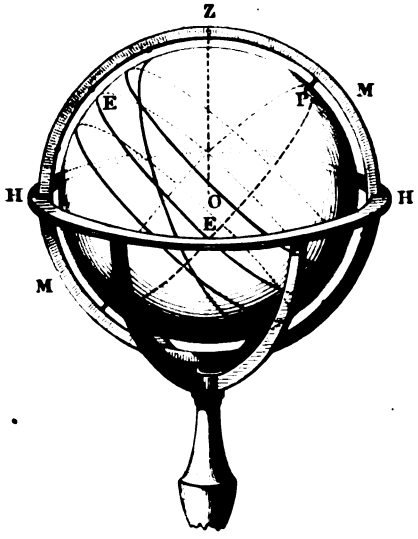
§ 5. Der Weg, den die Sonne am Himmel beschreibt, liegt zwar in der Nähe des Himmelsäquators, fällt aber doch nicht mit ihm zusammen. Im Sommer bewegt sich nämlich die Sonne nördlich vom Äquator, also auf der nördlichen Halbkugel des Himmels, und im Winter südlich vom Äquator, also auf der südlichen Halbkugel des Himmels. Die Sonne überschreitet den

Digitized by Google

Äquator am 21. März und am 23. September. An diesen Tagen ist der Tagbogen der Sonne 12 Stunden, ebenso der Nachtbogen. Diese Zeiten heißen die Tag- und Nachtgleichen oder Äquinoktien, und zwar das Frühlingsäquinoktium und das Herbstäquinoktium. Die Zeiten, um welche die Sonne am weitesten nördlich und südlich steht, heißen beziehungsweise Sommersolstitium, Sommersonnenwende, und Wintersolstitium, Wintersonnenwende.

Während man die Fixsterne auf die Oberfläche einer Kugel ein für allemal in der gegenseitigen Stellung, in der sie sich immer am Himmel befinden, einzeichnen kann, muß man die Sonne jeden Tag an einer anderen Stelle anbringen. Der Weg, den die Sonne so im Laufe eines Jahres unter den Fixsternen zurücklegt, bildet einen Kreis, dessen Ebene gegen die Ebene des Äquators geneigt ist und der Tierkreis oder Ekliptik genannt wird. Fig. 3 stellt einen Himmelsglobus vor. Er kann um zwei Zapfen P und Q gedreht werden, welche die Weltpole vorstellen, und die eine Hälfte der Kugel liegt oberhalb des Ringes HH, welcher den Horizont vorstellt. Wenn die Kugel gedreht wird, so verschiebt sich offenbar der Äquator EE in seiner eigenen Ebene, so daß man nicht nur die Weltpole, sondern auch den Himmelsäquator stets an derselben Stelle hat. Dagegen bewegt sich die Ekliptik (der Kreis, welcher den Äquator unter einem spitzen Winkel schneidet) so, daß sie zu einer gewissen Zeit des Tages hoch über dem Horizont, dagegen nach 12 Stunden mehr in der Nähe des Horizontes steht.

Fig. 3.



Himmelsglobus. HH Horizont, $HZMH$ Meridian, PQ Weltachse, EE Äquator.

Die Sternbilder des Tierkreises, nach denen die einzelnen Teile desselben benannt werden, sind uralt. Eine Abbildung des Tierkreises, die in Denderah in Ägypten aufgefunden worden ist (Fig. 4) und deren Alter man anfangs auf 12000 bis 16000 Jahre schätzte, stammt wahrscheinlich aus der Zeit Neros. Das Sternbild der Wage ist wahrscheinlich zuletzt von den Griechen hinzugefügt worden. Mit diesem ist die Anzahl der Tierkreisbilder 12, so daß die Sonne in jedem derselben durchschnittlich einen Monat verweilt. Die Symbole dieser Sternbilder findet man im Kalender. Die Reihenfolge kann man sich vermittelst der beiden folgenden Verse einprägen:

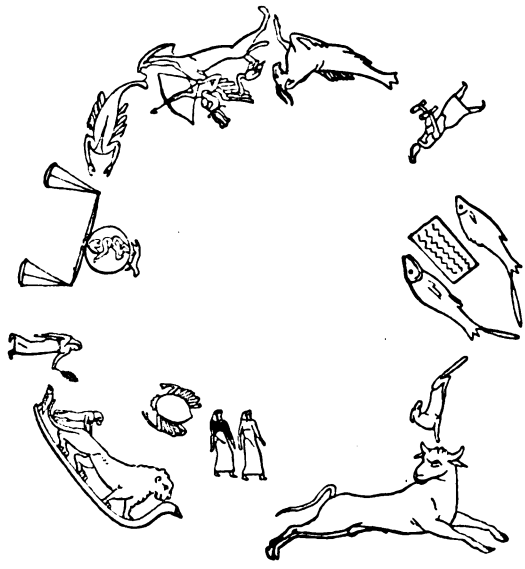
Digitized by Google

Sunt aries, taurus, gemini, cancer, leo, virgo,
Libraque scorpius, arcitenens, caper, amphora, pisces.

Der Durchschnittspunkt der Ekliptik mit dem Äquator, in welchem die Sonne zur Zeit des Frühlingsäquinoktiums steht heißt der Frühlingspunkt oder Widderpunkt.

§ 6. Die Größe des leuchtenden Teiles des Mondes, die Phase, hängt, wie man sich bei einiger Aufmerksamkeit bald überzeugt, nicht von der Stellung des Mondes unter den Sternen ab, sondern von seiner Stellung in Bezug auf die Sonne. Steht der Mond ungefähr in derselben Richtung wie die Sonne, so ist er unsichtbar, und wir haben „Neumond". Wenn der Mond dann einige Tagereisen nach Osten vorgeschritten ist, so daß er etwas später als die Sonne untergeht, so leuchtet er in Gestalt einer Sichel. Hat er sich ungefähr um einen viertel Umlauf von der Sonne entfernt, so erscheint er im ersten Viertel. Wenn er einen halben Umlauf gemacht hat, so daß er sich auf der entgegengesetzten Seite des Himmels befindet und also aufgeht, wenn die Sonne untergeht, so haben wir „Vollmond". Nach einem weiteren viertel Umlauf haben wir „letztes Viertel". Endlich holt er die Sonne wieder ein, aber da die Sonne selbst ein Stück weiter nach Osten gegangen ist, findet das Zusammentreffen nicht an derselben Stelle unter den Sternen statt wie das letzte Mal, sondern etwas weiter östlich, weil der Mond, nachdem er einen vollen Umlauf unter den Sternen gemacht hat, noch etwa zwei Tage braucht, um die Sonne wieder einzuholen. Wir unterscheiden daher zwei Umlaufszeiten des Mondes, die siderische in Bezug auf die Sterne, und die synodische in Bezug auf die Sonne. Nur die letztere ist insofern von praktischer Bedeutung, als durch sie der Mondwechsel bedingt ist. Die siderische Umlaufszeit des Mondes ist $27^d\ 7^h\ 43^m\ 11{,}3^s$, ungefähr $27\frac{1}{3}$ Tage, die synodische Umlaufszeit $29^d\ 12^h\ 44^m\ 2{,}9^s$, ungefähr $29\frac{1}{2}$ Tage.

Fig. 4.



Der Tierkreis von Denderah.

§ 7. Die Mondbahn fällt zwar nicht genau mit der Ekliptik zusammen, aber sie liegt derselben doch so nahe, daß man bei manchen Betrachtungen auf die Abweichung keine Rücksicht zu nehmen braucht. Zur Zeit der Sommer-

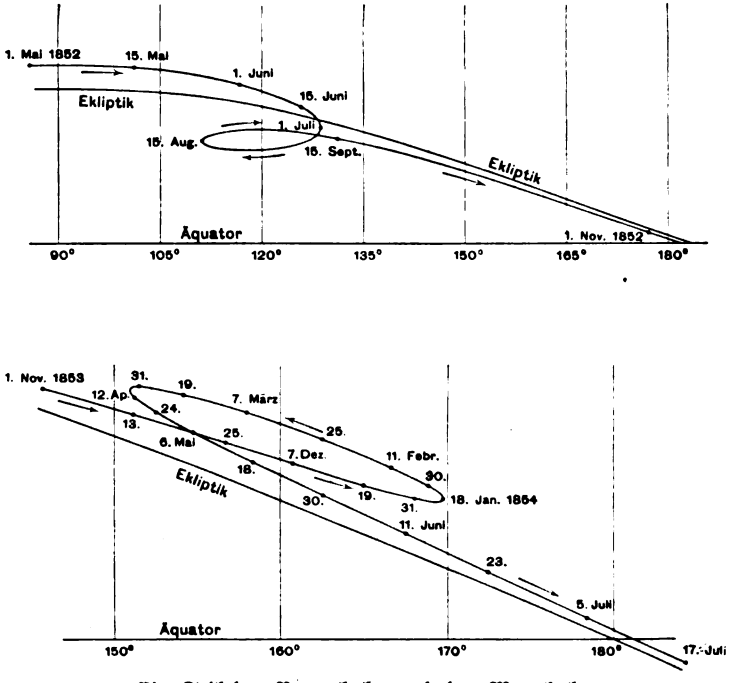
Digitized by Google

sonnenwende muß daher der Vollmond ungefähr da stehen, wo die Sonne zur Zeit der Wintersonnenwende steht. Er muß also tief am Himmel stehen und einen kleinen Tagbogen haben. Zur Zeit des Frühlingsäquinoktiums muß der Mond im ersten Viertel da stehen, wohin die Sonne nach einem viertel Jahr kommt, also weit nördlich vom Äquator. Er steht hoch am Himmel und hat einen großen Tagbogen.

Beispiel zur Übung. Wie verhält es sich im September mit dem Mond im ersten Viertel und im letzten Viertel? Man erkläre, woher es kommt, daß im Herbst der Mond zur Zeit des Vollmondes am folgenden Tage um wenig später aufgeht als am vorhergehenden.

§ 8. Ferner beobachteten die Alten am Himmel fünf mehr oder weniger leuchtende Sterne, die ebenfalls nicht fix waren, sondern sich ebenso wie die

Fig. 5.



Ein Teil der Venusbahn und der Marsbahn.

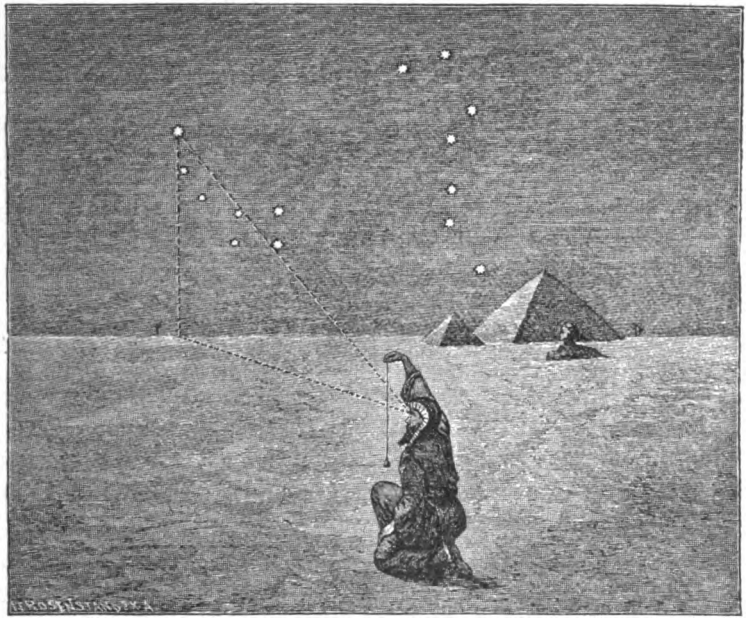
Sonne und der Mond im Tierkreis bewegten. Aber die Bahn, welche sie unter den Fixsternen beschreiben, ist viel unregelmäßiger. Sie bewegen sich bald nach Osten, bald nach Westen und zugleich abwechselnd nach der einen (nördlichen) und der anderen (südlichen) Seite der Ekliptik hin, so daß sie zuweilen förmliche Schleifen (Fig. 5) am Himmel beschreiben. Wir nennen sie mit den Griechen die Planeten, d. h. die Wandelsterne. Endlich erscheinen zuweilen unerwartet Sterne mit langen Schweifen, die wir mit dem

Digitized by Google

griechischen Namen Kometen benennen. Auch diese bewegen sich unregelmäßig unter den Fixsternen.

§ 9. Wie sorgfältig die Alten die Sterne beobachtet haben, geht unter anderem aus der Genauigkeit hervor, mit der die Bauwerke der Ägypter orientiert sind. Man hat die Ruinen solcher Bauwerke untersucht und gefunden, daß die Hauptlinien des Grundplanes von Osten nach Westen und von Norden nach Süden laufen. Eine ägyptische Inschrift an der Wand

Fig. 6.



Projizieren der Nordlinie.

einer Tempelruine beweist ebenfalls, daß die Ägypter die genaue Absteckung des Grundrisses des Tempels als etwas sehr Wichtiges betrachteten [1]).

Es scheint, daß man sich in den ältesten Zeiten im wesentlichen mit den festen Visierpunkten, die sich im Horizont darboten, begnügen mußte, und dies hatte seine große Bedeutung, da die genannten Völker in ebenen Ländern mit ziemlich freiem Horizont wohnten.

Wenn man sich genau denjenigen Punkt des Horizontes merkt, in dem ein Stern aufgeht, sowie denjenigen, in dem er untergeht, so liegt, wie leicht

[1]) In Chaldäa liegen die Bauten eher so, daß die Ecken nach den vier Himmelsgegenden gerichtet sind. Diese Orientierung ist jedoch lange nicht mit der Genauigkeit wie die ägyptische ausgeführt, und man hat hieraus schließen wollen, daß die Chaldäer nicht so genau beobachten konnten wie die Ägypter. Ein solcher Schluß hat jedoch wenig Berechtigung, da man nicht weiß, ob die Chaldäer überhaupt der richtigen Orientierung große Bedeutung beilegten.

Digitized by Google

Äquator an
Tagbogen d
heißen die T
äquinoktiu
Sonne am n
solstitium, S
wende.

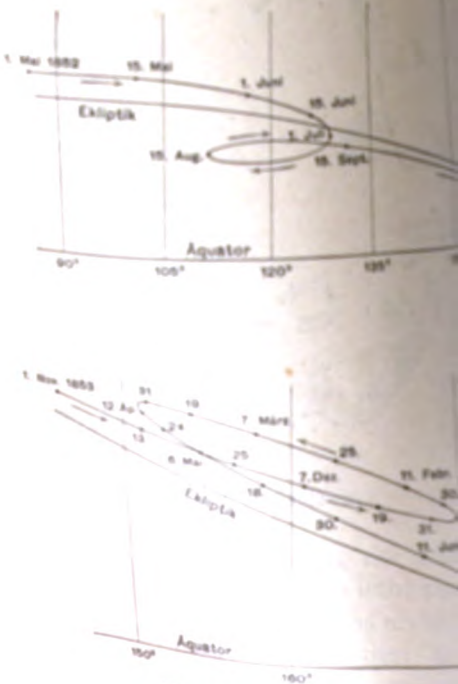
Währen
mal in der

sonnenwende muß daher der Vollmond ungefähr in
zur Zeit der Wintersonnenwende steht. Er muß also
und einen kleinen Tagbogen haben. Zur Zeit des
muß der Mond im ersten Viertel da stehen, wo
viertel Jahr kommt, also weit nördlich vom
Himmel und hat einen großen Tagbogen.

Beispiel zur Übung. Wie verhält es sich
Mond im ersten Viertel und im letzten Viertel?
kommt, daß im Herbst der Mond zur Zeit des
Tage um wenig später aufgeht als am vorhergehe

§ 8. Ferner beobachteten die Alten am Himm
leuchtende Sterne, die ebenfalls nicht für warm

Fig. 5.



Ein Teil der Venusbahn und

Sonne und der Mond im Tierkreis beweg
unter den Fixsternen beschreiben, ist viel u
bald nach Osten
(nördlichen)
zuweilen
sie mi
schein

nach Westen und zu
ren (südlichen) S
ten (Fig. 5) am
e Planeten, d.
wartet Sterne mit la

Digitized by Google

ometen benennen. Auch diese bewegen sich unregel-
ernen.
tig die Alten die Sterne beobachtet haben, geht unter
auigkeit hervor, mit der die Bauwerke der Ägypter
hat die Ruinen solcher Bauwerke untersucht und ge-
tlinien des Grundplanes von Osten nach Westen und
en laufen. Eine ägyptische Inschrift an der Wand

Fig. 6.

Projizieren der Nordlinie.

st ebenfalls, daß die Ägypter die genaue Absteckung
ipels als etwas sehr Wichtiges betrachteten [1]).
t sich in den ältesten Zeiten im wesentlichen mit den
die sich im Horizont darboten, begnügen mußte,
ße Bedeutung, da die genannten Völker in ebenen
em Horizont wohnten.
au denjenigen Punkt des Horizontes merkt, in dem
denjenigen, in dem er untergeht, so liegt, wie leicht

[1]) die Bauten eher so, daß die Ecken nach den vier Himmels-
ese Orientierung ist jedoch lange nicht mit der Genauig-
geführt, und man hat hieraus schließen wollen, daß die
eobachten konnten wie die Ägypter. Ein solcher Schluß
ng, da man nicht weiß, ob die Chaldäer überhaupt der
e Bedeutung beilegten.

Digitized by Google

einzusehen ist, der Nordpunkt des Horizontes genau zwischen jenen beiden Punkten in der Mitte.

Ferner haben es die genannten Völker des Altertums, die alle tüchtige Baumeister hatten, ohne Zweifel verstanden, das Lot zu gebrauchen, um den Ort eines Sternes auf den Horizont zu projizieren. Hält man die Schnur des Lotes so, daß sie für das Auge einen Stern bedeckt, so wird das untere Ende des Lotes einen Punkt des Horizontes treffen, der genau unter dem Stern liegt. Eine derartige Bestimmung von Norden kann ziemlich genau mit Hilfe des Polarsterns gemacht werden, da sich dieser nur in einem sehr kleinen Kreis bewegt. Fällt man die Senkrechten, wenn der Polarstern am weitesten rechts und wenn er am weitesten links steht, oder fällt man sie in beliebiger Stellung des Polarsterns in einem Zwischenraum von 12 Stunden, so liegt Norden genau in der Mitte zwischen den so gefundenen Punkten des Horizontes.

§ 10. Ungleich schwieriger war für die Alten die Aufgabe, die Höhe eines Sternes oder der Sonne über dem Horizont zu bestimmen. Aus Berichten und Abbildungen geht hervor, daß alle die genannten Völker des Altertums dies vermittelst eines vertikalen Stabes getan haben, den auch die Griechen benutzten und Gnomon nannten.

Eine chinesische Schrift, Tcheou-pey, die vielleicht aus dem 11. Jahrhundert v. Chr. stammt, enthält eine recht interessante Beobachtung mit diesem einfachen Apparat. Der Verfasser dieser Schrift hat bei Loyang beobachtet, einen wie langen Schatten ein vertikaler Stab von 8 Fuß Länge um die Mittagszeit wirft, und zwar einmal, wenn die Sonne im Sommersolstitium, und dann, wenn sie im Wintersolstitium steht, d. h. wenn sie um Mittag am höchsten und wenn sie um dieselbe Zeit am tiefsten steht. Im ersten Falle war die Schattenlänge $1^{13}/_{24}$ Fuß, im zweiten $13^{1}/_{8}$ Fuß. Wie wir später sehen werden, ändert sich die Höhe, welche die Sonne im Sommer und im Winter erreicht, etwas im Laufe der Jahrtausende. Allein wenn man von unserer Zeit aus zurückrechnet, so findet man ganz richtig, daß die Sonne im Jahre 1100 v. Chr. am Himmel von Loyang so hoch gestanden haben muß, daß die Schatten die in der Schrift angegebenen Längen hatten. Dieses deutet darauf hin, daß die Schrift echt ist, was bei chinesischen Angaben zuweilen der Bestätigung bedarf.

§ 11. Man kann die Länge des Schattens eines Stabes wohl dazu benutzen, die Stellung der Sonne anzugeben, aber die Schattenlänge kann eigentlich nicht ein Maß für die Höhe der Sonne genannt werden. Der kurze Schatten gibt nämlich an, daß die Sonnenhöhe groß ist, und der lange Schatten, daß diese Höhe klein ist. Man könnte trotzdem die Schattenlänge als Maß benutzen, wenn der doppelten Schattenlänge die halbe Sonnenhöhe entspräche. Dies ist jedoch nicht der Fall.

Erst die Chaldäer haben ein wirklich befriedigendes Maß für derartige Dinge geschaffen. Mit Rücksicht darauf, daß die Sonne im Laufe eines Jahres einen vollen Umlauf unter den Sternen macht, fanden es die Chaldäer

Digitized by Google

zweckmäßig, das gleiche Stück, welches die Sonne an einem Tage fortschreitet, als Maßeinheit zu benutzen. Dieses Stück ist nun $\frac{1}{365^1/_4}$ des ganzen Kreisumfanges, da das Jahr $365^1/_4$ Tage hat. Diesen Bruch rundeten sie jedoch auf $\frac{1}{360}$ ab, der nicht um $\frac{1}{20000}$ vom richtigen Wert abweicht. Da sie nun den Kreis, in dem sich die Sonne bewegt, in 360 Teile eingeteilt hatten, teilten sie jeden anderen Kreis in derselben Weise [1]).

Diese Einteilungsweise wurde später von den Griechen in Alexandria aufgenommen und ist bis auf den heutigen Tag in Gebrauch. Wir nennen die Teile Grade und bezeichnen z. B. einen Bogen, der dreizehn Dreihundertsechzigstel des Umfanges umfaßt, durch 13^0.

Die Linie, mit welcher der Kreis beschrieben ist, der Radius, kann genau sechsmal hintereinander als Sehne in den Kreis eingetragen werden. Dies veranlaßte die Chaldäer, jeden Grad in 60 Minuten und jede Minute in 60 Sekunden zu teilen, und man schreibt jetzt z. B. $13^0\,47'\,19''$ anstatt $\frac{13 + {}^{47}/_{60} + {}^{19}/_{3600}}{360}$.

Eine wie große Aufgabe hiermit gelöst war, erkennt man am besten, wenn man bedenkt, wie schwer es ist, sich mit einem anderen über den scheinbaren Abstand zweier Sterne voneinander zu verständigen, wenn man diesen in Längenmaß auszudrücken versucht. Wenn ihn der eine auf ein Meter, der andere auf ein halbes Meter schätzt, so beweist dieses nur, daß sie sich die Sterne in verschiedener Entfernung denken. Die Chaldäer dagegen schufen ein Maß für den Abstand zweier Sterne, welches immer dasselbe bleibt, einerlei in welcher Entfernung man sich die Sterne denkt. 13^0 oder ${}^{13}/_{360}$ des Kreisumfanges ist z. B. etwas, was man sich um den ganzen Himmel herum durch die Sterne hindurch gezeichnet denken kann. Es ist verhältnismäßig nicht sehr schwierig, einen Maßstab für mehr handgreifliche Dinge, ein Meter, ein Pfund u. dergl., zu wählen, aber die Erfindung eines Maßes für die nicht existierenden, sondern nur gedachten Bogen am Himmel bezeichnet einen sehr bedeutenden Kulturfortschritt.

Der Vorzug dieses neu eingeführten Maßes besteht also nicht in der Teilung in 360 und 60 und nochmals 60 Teile. Diese kann eher als unbequem bezeichnet werden, wenn man sonst nach dem Dezimalsystem rechnet. Allein wenn selbst die französische Revolution mit dieser Zahl nicht aufzuräumen vermochte, und wenn wir jedesmal, wenn wir nach der Uhr sehen, unsere an das Dezimalsystem gewöhnte Vorstellung dem Sechzigersystem der Chaldäer anbequemen, so ist dies ein Tribut, den wir noch in unserem Zeitalter der Eisenbahnen dem alten Volke darbringen, das die schwierige Auf-

[1]) Auch die Chinesen haben, wie es scheint, den Kreis nach der täglichen Sonnenbewegung in $365^1/_4$ Teile geteilt, was eine sehr unbequeme Einteilung für alle Kreise mit Ausnahme der Ekliptik ist.

Digitized by Google

gabe löste, ein Maß für etwas so wenig Handgreifliches wie den Abstand der Sterne zu finden.

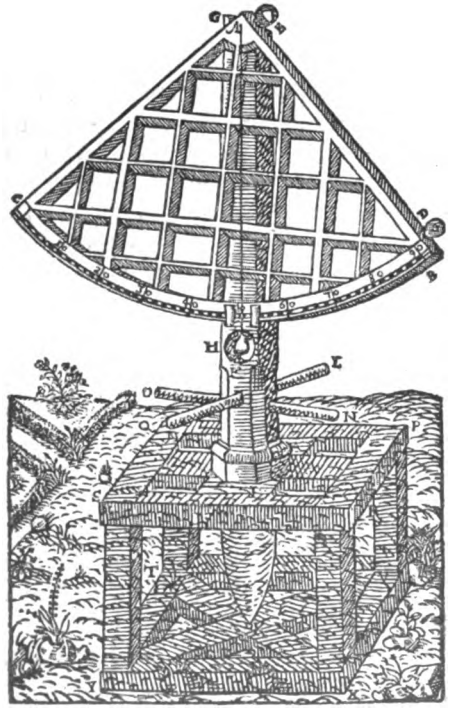
Beispiel 1. Wenn ein Stern $32^0\,15'$ vom Nordpunkte des Horizontes entfernt untergeht, wie weit ist er dann vom Westpunkt, vom Südpunkt und vom Ostpunkt des Horizontes entfernt?

2. Wenn die Sonne 66^0 über dem Horizont steht, wie weit ist sie dann vom Zenit und vom Nadir, d. h. von denjenigen Punkten entfernt, in denen die Vertikallinie oben und unten die Himmelskugel trifft?

§ 12. Nachdem das Maß gefunden war, bot die Anfertigung von Vorrichtungen, mit denen diese Messungen ausgeführt werden konnten, keine besonderen Schwierigkeiten.

Die Griechen erwähnen eine solche vom Baumeister Theodoros von Samos erfundene Vorrichtung. Dies beweist jedenfalls, daß man derartige Vorrichtungen im 7. Jahrhundert v. Chr. gekannt hat, deutet aber vielleicht darauf hin, daß sie von Osten her gekommen sind. Denn es ist wohl anzunehmen, daß die Chaldäer von ihrer Erfindung auch praktische Anwendung gemacht haben.

Fig. 7.



Tycho Brahes Quadrant.

In Ermangelung von zuverlässigen Zeichnungen solcher Instrumente aus dem Altertum ist in Fig. 7 ein Quadrant (Viertelkreis) abgebildet, der von Tycho Brahe konstruiert und benutzt worden ist. Er hängt an einem vertikalen Pfahl, der vermittelst der Stangen ON und QL so gedreht werden kann, daß die Ebene des Quadranten durch den Stern geht, dessen Höhe gemessen werden soll. Der Quadrant selbst kann in seinem Mittelpunkt A um einen an dem Pfahl befestigten horizontalen Zapfen gedreht werden, und vom Mittelpunkt hängt an einer Schnur das Lot H herab. D und E sind Visiere, deren Richtung auf den Stern eingestellt wird. Diese Richtung ist parallel der Linie, die das Zentrum des Quadranten mit dem Teilstrich 90 verbindet. Daher ist der Zenitabstand des Sternes gleich der Anzahl der Grade von

Digitized by Google

90 bis zum Lot, folglich die Höhe des Sternes (der Komplementwinkel zum Zenitabstand) gleich der Anzahl der Grade von 0 bis zum Lot.

§ 13. Eine der wichtigsten Höhenbestimmungen, welche die Alten ausführten, gleichviel ob es mit dem Gnomon oder mit dem geteilten Kreis geschah, war die Messung der Sonnenhöhe zur Zeit des Sommersolstitiums und des Wintersolstitiums (vergl. § 10). Wenn wir z. B. an einem Orte, der unter dem 50. Breitengrad liegt, die Mittagshöhe der Sonne zur Zeit des Sommersolstitiums gleich 63° 27′ und zur Zeit des Wintersolstitiums gleich 16° 33′ finden, so ist die Sonne im ersten Falle offenbar dem Nordpol um 46° 54′ näher als im letzten. Sie entfernt sich also vom Äquator nach jeder Seite hin um 23° 27′. Dies ist die Neigung der Ekliptik gegen den Äquator oder die sogenannte Schiefe der Ekliptik.

§ 14. Die Bewegungen der Sonne, des Mondes und der Sterne geben naturgemäße Anhaltspunkte für Zeitbestimmungen. Die Himmelsbeobachtungen der Völker des Altertums bekamen daher besondere Bedeutung für ihre Zeiteinteilung und Zeitrechnung.

Für die Bewohner nördlicherer Gegenden kann es etwas Auffallendes haben, daß die Völker des Altertums bei der Zeiteinteilung zuweilen dem Mond den Vorzug vor der Sonne geben konnten. Der Wechsel von Tag und Nacht ist eine Erscheinung, die den Menschen geradezu zwingt, sich nach ihr zu richten, und auch der Unterschied zwischen Sommer und Winter ist ein so eingreifender, daß das Rechnen nach Sonnenjahren uns als etwas Unumgängliches erscheint. Man muß sich jedoch erinnern, daß die genannten Völker des Altertums unter Himmelsstrichen lebten, wo der Unterschied zwischen Sommer und Winter nicht sehr groß ist, während in den milden Nächten, deren Länge das ganze Jahr hindurch nicht viel von 12 Stunden abweicht, das Licht des Mondes im Leben des Menschen eine wichtige Rolle spielt.

Ein Mondwechsel dauert aber nicht eine volle Anzahl von Tagen, und ein Sonnenjahr auch nicht, so daß es schon mit Schwierigkeiten verbunden ist, die Anzahl der Tage eines Monats und eines Jahres festzusetzen. Überdies stehen die Umlaufszeiten von Mond und Sonne nicht in einem einfachen Verhältnis zueinander, und es bietet daher noch mehr Schwierigkeiten, die Einteilung des Monats und des Jahres in ein regelrechtes Verhältnis zueinander zu bringen. Einige einzelne Beispiele von der Zeitrechnung der Alten sind die folgenden.

§ 15. Die Ägypter setzten das Jahr auf 365 Tage fest, während es in Wirklichkeit ungefähr um einen viertel Tag länger ist. Am Ende des ersten Jahres fehlte also etwas an einem vollen Umlauf, am Ende des zweiten Jahres das doppelte u. s. w. Die Sonne und folglich auch die Jahreszeiten trafen also nach und nach im Verhältnis zum Datum immer später ein, und nach Verlauf einiger Jahrhunderte fiel der Sommer in diejenigen Monate, welche ursprünglich die Wintermonate gewesen waren. Die ursprüngliche Ordnung mußte nach Verlauf von 1460 Jahren wieder erreicht

Digitized by Google

werden, da in diesem Zeitraum die jährlichen Verspätungen der Sonne auf einen vollen Umlauf aufgelaufen waren.

Dies war den Ägyptern bekannt, und da das erste Jahr dieses langen Zeitraumes mit dem heliakischen Aufgang des Hundssternes begann (vergl. § 4) und es dann 1460 Jahre dauerte, bis der Anfang des Jahres wieder mit diesem Aufgang zusammenfiel, nannte man diesen Zeitraum die Hundssternperiode oder die Sothisperiode. Eine solche Periode begann im Jahre 2782 v. Chr., die nächste im Jahre 1322 v. Chr., die folgende im Jahre 139 n. Chr.

§ 16. Bei den Ägyptern und anderen Völkern des Altertums waren derartige genaue Bestimmungen eine Angelegenheit des Staates und der Religion und wurden von den Priestern ausgeführt, während sich das gemeine Volk an mehr auffallende Zeiteinteilungen hielt. So benutzte man in Ägypten Mondmonate, deren Beginn von dem Tage an gerechnet wurde, an welchem der Mond zum erstenmal nach Neumond sichtbar war. Auch die Hebräer rechneten in alter Zeit nach Mondmonaten, aber das Jahr umfaßte nicht immer 12 Monate. Die Hebräer rechneten nämlich ebenfalls den Monat von demjenigen Tage an, an welchem der Mond von neuem sichtbar wurde, und die Länge des Jahres wurde je nach Umständen auf 12 oder 13 Monate festgesetzt. Die Umstände, auf die man Rücksicht nahm, waren die Ernteaussichten, denn die erste Gerstenähre sollte zu Ostern, welches in den ersten Monat (Nisan) des Jahres fiel, Jehovah geopfert werden. Auf diese Weise wurde dafür gesorgt, daß sich die Jahreszeiten in Bezug auf die Monate niemals wesentlich verschieben konnten. Hiermit in Zusammenhang steht es auch, daß das christliche Osterfest nicht immer auf denselben Tag fällt.

Eine beständige Verschiebung fand dagegen bei den Arabern und bei mehreren mohammedanischen Völkern statt. Der Monat hatte bei ihnen abwechselnd 30 und 29 Tage, und ein Jahr bestand stets aus 12 derartigen Monaten, 6 zu 30 und 6 zu 29 Tagen. Das Jahr war also im Vergleich mit dem wirklichen Jahr um ungefähr 11 Tage zu kurz. Daher verschoben sich die Jahreszeiten mit Rücksicht auf die Monate, und zwar recht schnell, so daß sie nach 33 arabischen oder 32 wirklichen Jahren wieder zur richtigen Zeit eintrafen. Ein Mondmonat ist jedoch $44^m\,3^s$ länger als $29^1/_2$ Tage (§ 6). Die Bewegung des Mondes würde also nach Verlauf einiger Jahre nicht mehr dem Monat entsprochen haben, und man mußte, um dieses zu erreichen, ungefähr jedes dritte Jahr einen Tag einschalten, damit der Mond das Versäumte einholen konnte. Der letzte Monat des Jahres, der sonst 29 Tage gehabt hätte, erhielt zu diesem Zwecke 30 Tage. So ließ es sich einigermaßen erreichen, daß der Monat mit dem Lauf des Mondes in Einklang stand, aber das Jahr entsprach durchaus nicht dem Laufe der Sonne.

§ 17. Es ist leicht einzusehen, wie schwierig es war, eine Zeitrechnung zu finden, die sowohl der Sonnenbewegung als auch der Mondbewegung entspricht. Ein Volk, welches vor spekulativen Aufgaben nicht zurückzuweichen pflegte, nämlich die Griechen, erhielten vom Orakel die Antwort, das Jahr

Digitized by Google

müsse sich nach dem Gang der Sonne richten, die Monate und Tage nach dem Gang des Mondes. Man suchte nun die Zeiteinteilung in verschiedener Weise zu ordnen, doch fand die Frage erst eine befriedigende Lösung durch den Vorschlag, den Meton bei den olympischen Spielen im Jahre 432 v. Chr. machte. Meton hatte berechnet, daß die Sonne 19 und der Mond 235 Umläufe in 6940 Tagen macht. Er schlug daher vor, 19 aufeinander folgende Jahre aus 235 Monaten und aus 6940 Tagen bestehen zu lassen. Die Monate sollten zum Teil 29, zum Teil 30 Tage bekommen, so daß sich der Beginn der Monate niemals um mehr als einen halben Tag in Bezug auf den Mond verschieben konnte. Ferner sollten die Jahre zum Teil aus 12, zum Teil aus 13 Monaten bestehen, so daß sich das Jahr niemals in Bezug auf die Jahreszeiten um mehr als einen halben Monat verschieben konnte. Der Vorschlag wurde durch Akklamation angenommen und kam nicht nur in Griechenland, sondern zugleich auch in allen Kolonieen zur Ausführung. Die Berechnung wurde an öffentlichen Plätzen in goldenen Buchstaben angebracht, was zu der Bezeichnung „die goldene Zahl" Veranlassung gegeben hat, die auch in die Kalender der neueren Zeit übergegangen ist.

Der Metonsche Cyklus erwies sich jedoch als nicht ganz richtig. Die 6940 Tage sind $9^1/_2$ Stunden mehr als 19 Sonnenjahre und $7^1/_2$ Stunden mehr als 235 Mondmonate. Dies wurde von Kalippus berichtigt, der vorschlug, daß vier Metonsche Perioden eine größere Periode von 76 Jahren bilden sollten, deren erster Monat einen seiner 30 Tage verlieren mußte.

Hiermit war die schwierige Aufgabe, die Bewegungen der Sonne und des Mondes in einer Zeitrechnung auszugleichen, sehr genau gelöst, und die Mondphasen waren mit den Kalendermonaten verknüpft, allein daß die Jahre eine so ungleiche Länge wie 354 und 384 Tage haben können, würde jedenfalls für unser bürgerliches Leben ziemlich unbequem sein.

§ 18. Unsere gegenwärtige Zeitrechnung stammt von Rom und nimmt ausschließlich auf die Sonne Rücksicht. Bis zur Zeit Julius Cäsars hatte man in Rom einen Kalender mit 12 Monaten gehabt. Die Namen der Monate waren die noch heute gebräuchlichen mit Ausnahme von Juli und August, die erst später (statt Quintilis und Sextilis) zu Ehren Cäsars und Augustus' eingeführt wurden. Die Anzahl der Tage der Monate war 28 bis 31, aber im ganzen zu klein, so daß man in jedem zweiten Jahre einen Monat (Mercedonius) zu 22 oder 23 Tagen einschalten mußte. Dieser Kalender entsprach weder der Sonnenbewegung noch der Mondbewegung. Julius Cäsar beschloß, ihn mit Hilfe des alexandrinischen Astronomen Sosigenes zu verbessern. Nach einem Jahr von 445 Tagen, dem sogenannten Jahr der Verwirrung, trat im Jahre 46 v. Chr. der julianische Kalender in Kraft, nach welchem auf je drei Jahre zu 365 Tagen ein „Schaltjahr" zu 366 Tagen folgt. Dieser Kalender wurde später von der christlichen Kirche angenommen, und die Schaltjahre sind diejenigen Jahre, deren Zahl durch 4 teilbar ist, z. B. 1896.

Da die Monate dieses Kalenders nicht mehr der Umlaufszeit des Mondes

Digitized by Google

entsprechen, so hat jeder Monat die Anzahl von Tagen, die ihm von den Römern willkürlich beigelegt wurde. Wie man an den Knöcheln der Hand abzählen kann, welche Monate 30 und welche 31 Tage haben, ist allgemein bekannt. Februar hat 28 und im Schaltjahr 29 Tage. Bei den Römern war der Schalttag der 24., der wiederholt wurde. Man findet daher auch heute noch zuweilen im Kalender diesen Tag (anstatt des 29.) als Schalttag bezeichnet.

§ 19. Nach dem julianischen Kalender sind die Jahre durchschnittlich gleich $365^1/_4$ Tagen angenommen, was $11^m 12^s$ zu viel ist. Dieser Fehler macht in 129 Jahren einen ganzen Tag aus.

Auf diesen Fehler wurde im 13. Jahrhundert von Roger Bacon hingewiesen, der dem Papst vergebens die Berichtigung desselben empfahl. Erst drei Jahrhunderte später erhoben sich in demselben Sinne so viele Stimmen, daß Papst Gregor XIII. eine gelehrte Kommission niedersetzte, auf deren Vorschlag eine päpstliche Bulle im Jahre 1582 die Einführung des gregorianischen Kalenders anordnete.

Um den Kalender bis auf die Zeit des Konzils von Nikäa (325 n. Chr.) zurückführen zu können, auf dem bestimmt wurde, daß der Ostersonntag auf den ersten Sonntag nach dem ersten Vollmond nach dem Frühlingsäquinoktium fallen sollte (vergl. § 16), wurde angeordnet, daß 10 Tage, die man in den seitdem verlaufenen 1257 Jahren zu viel bekommen hatte, ausfallen sollten. Demnach sollte der auf den 4. Oktober 1582 folgende Tag als der 15. Oktober bezeichnet werden.

Damit sich nun in Zukunft nicht wieder ein Fehler einschleichen könne, wurde folgendes bestimmt:

Das Jahr soll 365 Tage haben.

Ausnahme. Wenn die Jahreszahl durch 4 teilbar ist, so soll das Jahr 366 Tage haben.

Ausnahme von der Ausnahme. Die sogenannten Säkularjahre, z. B. 1800, 1900 u. s. w., sollen nur 365 Tage haben, obschon ihre Zahl durch 4 teilbar ist.

Ausnahme von der Ausnahme der Ausnahme. Diejenigen Säkularjahre, deren Zahl durch 400 teilbar ist, z. B. 1600, 2000, sollen 366 Tage haben.

Mit dieser Verbesserung würde der Kalender richtig bleiben, wenn der julianische Kalender in 400 Jahren genau um drei Tage oder in $133^1/_3$ Jahren um einen Tag falsch gewesen wäre. Der Fehler beträgt aber einen Tag in 129 Jahren. Es wird sich also doch im Laufe der Zeit wieder ein Fehler ansammeln, und der gregorianische Kalender bestimmt daher vorläufig, daß das Jahr 4840 n. Chr. nicht, wie es die allgemeine Regel erfordern würde, ein Schaltjahr sein soll. Nach Verlauf von weiteren 3600 Jahren wird man wieder an eine Berichtigung denken und einen Schalttag ausfallen lassen müssen u. s. w.

Digitized by Google

Die protestantischen Länder zeigten sich gegen alles, was von päpstlicher Seite kam, zurückhaltend, und man zögerte daher mit der Einführung des „neuen Stiles". Man blieb über 100 Jahre lang hinter den Papisten um 10 Tage zurück. Das Jahr 1600 machte den Unterschied nicht größer, da es sowohl nach dem julianischen als auch nach dem gregorianischen Kalender ein Schaltjahr war. Das Jahr 1700 dagegen würde den Unterschied auf 11 Tage erhöht haben. Allein in diesem Jahre ging man auch im protestantischen Deutschland, in Dänemark und anderen Ländern zum neuen Kalender über und ließ auf den 18. Februar sofort den 1. März folgen.

Rußland dagegen kam im Jahre 1700 und im Jahre 1800 um je einen Tag weiter zurück, und da es auch mit dem Jahre 1900 nicht zum gregorianischen Kalender übergegangen ist, ist es jetzt gegen diesen um 13 Tage zurück.

Bei diesen Schwierigkeiten, den Kalender mit Rücksicht auf die Sonne in Ordnung zu bringen, war man genötigt, den Mond ganz außer Betracht zu lassen, und man begnügt sich jetzt damit, in den Kalendern für jeden Tag die Stellung des Mondes anzugeben. Unsere Monatseinteilung ist also nur ein Rest früherer Kulturen, der mit dem Mondwechsel eigentlich gar nicht mehr zusammenhängt.

§ 20. Was die Wochenteilung betrifft, so ist die Zahl der Wochentage merkwürdig, weil die Zahl sieben weder mit dem Zahlensystem irgend eines Volkes, noch auch mit der Mondbewegung in einem einfachen Zusammenhang steht. Wenn der Monat 28 Tage hätte, so wäre die Vierteilung zu verstehen. Da aber der Monat eher 30 Tage umfaßt, würde eine Einteilung in 2, 3, 5, 6 oder 10 Teile leichter zu verstehen sein.

Ein griechischer Schriftsteller des zweiten Jahrhunderts n. Chr., Dion Cassius, erklärt die Wochenteilung und die Namen der Wochentage durch die sieben damals bekannten beweglichen Himmelskörper, Sonne, Mond und die fünf Planeten. Die Erklärung klingt jedoch etwas künstlich[1]).

Die Wochentage waren schon bei den Ägyptern nach Himmelskörpern benannt. Die Hebräer dagegen hatten keine besonderen Namen für die

[1]) Cassius führt die sieben Himmelskörper nach der Geschwindigkeit, mit der sie sich am Himmel bewegen, in folgender Reihenfolge auf: Saturn (der langsamste), Jupiter, Mars, Sonne, Venus, Merkur und Mond. Jedem derselben wird nun eine Stunde geweiht, und zwar die Stunde von 12 bis 1 am Samstag Morgen dem Saturn, dann jedem folgenden eine Stunde, also die siebente dem Mond, dann wieder die achte dem Saturn u. s. w. Dann bekommt die Sonne die Stunde von 12 bis 1 am Sonntag Morgen. Daher wurde der Samstag nach dem Saturn, der Sonntag nach der Sonne benannt u. s. w. In den entsprechenden Stunden am Montag, Dienstag, Mittwoch, Donnerstag und Freitag kommen der Mond, Mars, Merkur, Jupiter und Venus an die Reihe. In verschiedenen europäischen Sprachen stehen allerdings die Namen der Wochentage mit dieser Erklärung im Einklang. Allein man kann gerade so gut annehmen, daß man den Wochentagen die Namen der Planeten einfach nur deshalb beigelegt hat, weil die Anzahl beider gleich sieben war. (Die siebentägige Woche ist höchstwahrscheinlich auf die Mondphasen zurückzuführen, die ungefähr nach je sieben Tagen aufeinander folgen. Anm. d. Übers.)

Digitized by Google

Wochentage mit Ausnahme des „Sabbat". Die übrigen wurden mit den ersten Buchstaben des Alphabetes bezeichnet. Ein natürlicher Zusammenhang zwischen den Planeten und den Wochentagen ist jedoch nicht nachzuweisen. Hier kann nur von religiösen Erklärungen die Rede sein, wie in der Bibel (1. Mos. 1, 2).

§ 21. Zuweilen wird bekanntlich ein größerer oder kleinerer Teil des Mondes verfinstert. Alle gebildeten Völker des Altertums konnten, wie es scheint, diese Verfinsterungen voraussagen, und namentlich in China gehörte dies, wie wir wissen, zu den vornehmsten Pflichten der Astronomen. Die Versäumnis dieser Pflichten konnte sogar mit Hinrichtung bestraft werden. Man hat bis weit in die historische Zeit hinein Beispiele von solchen Hinrichtungen und von Berufung indischer oder europäischer Astronomen, da die Feste, welche bei Gelegenheit der Finsternisse gefeiert wurden, als etwas angesehen wurden, was unter keinen Umständen versäumt werden durfte.

So berichten alte Dokumente über die Hinrichtung der Astronomen Hi und Ho, die eine am 13. Oktober 2128 v. Chr. eintretende Sonnenfinsternis nicht vorausgesagt hatten.

Die Möglichkeit der Voraussagung der Verfinsterungen beruhte auf der Entdeckung, daß sich die Verfinsterungen im Verlaufe von 18 Jahren und 11 Tagen (genau 6585,32 Tagen), d. h. in einem Zeitraum von 222 synodischen Monaten in derselben Reihenfolge und mit annähernd gleicher Stärke wiederholen. Die Wiederholungen sind jedoch nicht ganz genau, sondern einige Verfinsterungen treten z. B. etwas stärker, andere etwas schwächer auf, als in der vorhergehenden Periode. Ebenso tritt zuweilen eine neue schwache Verfinsterung auf, die in den folgenden Perioden stärker wird, während eine von den alten Verfinsterungen zuletzt verschwinden kann. Wenn also die chinesischen Astronomen auch im Besitze langer Verzeichnisse waren, ist es doch leicht zu erklären, daß sie die Entwickelung einer neuen Verfinsterung übersehen konnten. — Der Grieche Thales (§ 23) lernte die Kunst zuerst bei den Ägyptern, doch scheinen die Griechen später den Chaldäern den Vorzug gegeben zu haben, was auch, wie es scheint, durch die langen sorgfältigen Beobachtungen, die die Griechen nötig hatten, gerechtfertigt war. Die Chaldäer teilten Alexander dem Großen mit, sie hätten Beobachtungen von 1903 Jahren, und in dieser Zeit hätten 832 Mondverfinsterungen und 373 Sonnenverfinsterungen stattgefunden. Dies kann sehr gut der Wirklichkeit entsprechen, wenn man berücksichtigt, daß sich bei dem fast immer wolkenfreien Himmel wahrscheinlich nur wenige Verfinsterungen der Beobachtung entzogen haben.

Die Griechen.

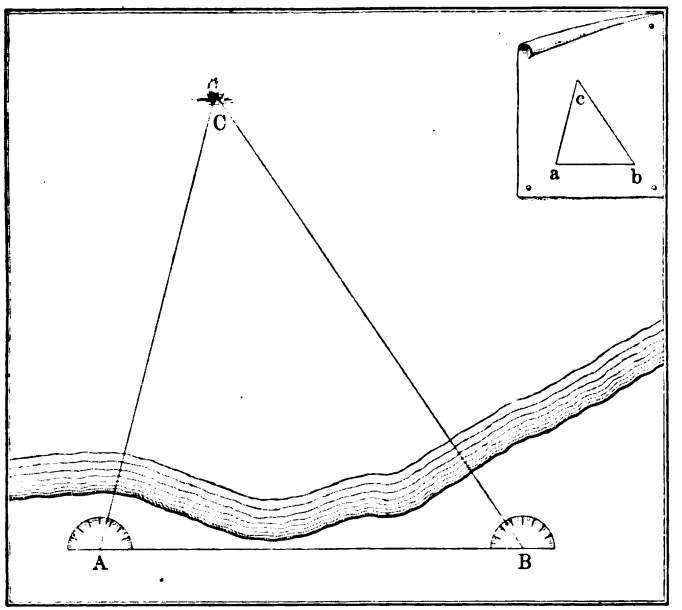
§ 22. Während die Geschichte der Naturforschung bei den Chinesen, den Indern, Chaldäern und Ägyptern nicht an bestimmte Persönlichkeiten — höchstens an den einen oder anderen sagenhaften Kaiser — geknüpft ist, beginnt bei den Griechen die Personalgeschichte der Naturforschung, wenn auch

Digitized by Google

anfangs mit einiger Unsicherheit. Von den meisten der ältesten griechischen Weisen wird übrigens ausdrücklich erzählt, daß sie eine längere oder kürzere Zeit in Ägypten mit Studien zugebracht haben. Die griechischen „Philosophen" suchten Aufgaben, die nicht mit der Hand bewältigt werden konnten, durch Denken zu lösen. So schufen sie das Denkinstrument, welches man die Mathematik nennt und ohne welches eine gründliche Naturwissenschaft nicht möglich ist. Auch hatten die Griechen eine Vorstellung von manchem Zusammenhang zwischen den Naturerscheinungen, von dem die Alten anscheinend keine Ahnung gehabt haben.

§ 23. Thales von Milet (um 640 bis 548 v. Chr.), der erste der „sieben Weisen Griechenlands", wird als der Begründer der Mathematik genannt. Obwohl wir hier nicht näher auf diesen Gegenstand eingehen können,

Fig. 8.



Messung der Entfernung eines Schiffes.

soll doch die Lösung einer Aufgabe angeführt werden, durch die Thales die Entfernung eines Schiffes auf dem Meere ermittelte. Dieselbe Aufgabe, die Entfernung eines unzugänglichen Gegenstandes zu bestimmen, bietet sich bei der Messung der Entfernung der Himmelskörper. Zwei Beobachter A und B (Fig. 8) stellen sich am Ufer in einem gewissen bekannten Abstand, z. B. 1000 m, voneinander auf. Jeder ist mit einem geteilten Kreise versehen und er hält diesen so, daß der Nullpunkt dem anderen Beobachter zugewendet ist. Sodann visieren beide durch das Zentrum nach dem Schiffe und merken sich, wieviel Grad die Sehlinie auf dem Kreis abschneidet. Man kann nun,

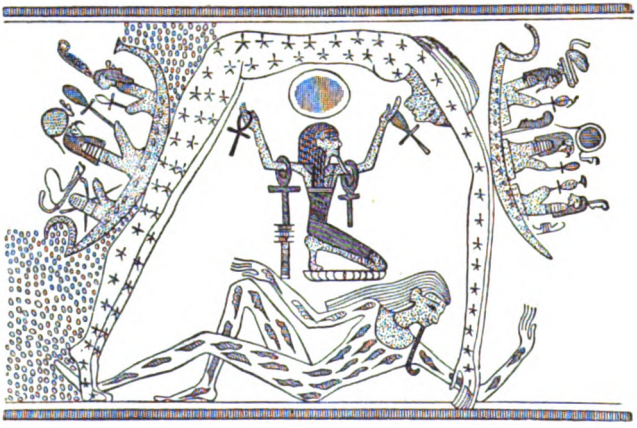
Digitized by Google

wenn man will, ein verkleinertes Bild des Ganzen zeichnen, indem man an eine Linie ab die geteilten Kreiſe in a und b anlegt und zwei Linien durch die betreffenden Punkte der Kreisteilung zieht. Die beiden Linien ſchneiden ſich in c, und man hat ſo ein verkleinertes Bild des großen Dreiecks ABC. Da nun ab die Linie AB, welche 1000 m iſt, vorſtellt, ſo kann man mit dieſer die Linie ac meſſen, die AC, die Entfernung des Schiffes von A, vorſtellt.

Die Möglichkeit, eine derartige Aufgabe in der angegebenen Weiſe zu löſen, iſt ſicher für Thales und die Griechen ein Sporn geweſen, auf dieſem Wege fortzuſchreiten, und im Laufe der folgenden Jahrhunderte machte die Mathematik erſtaunliche Fortſchritte. Trotz der großen Bedeutung, die die Mathematik für die Naturwiſſenſchaft hat, kann auf die Entwickelung dieſer Wiſſenſchaft hier nicht näher eingegangen werden.

§ 24. Etwas anderes, was ſich die Griechen im Gegenſatz zu älteren Völkern klar zu machen ſuchten, war der Bau des Weltalls. Die Ägypter hatten denſelben nur ſymboliſch dargeſtellt (Fig. 9), und in älterer Zeit

Fig. 9.



Ägyptiſches Symbol des Weltalls.

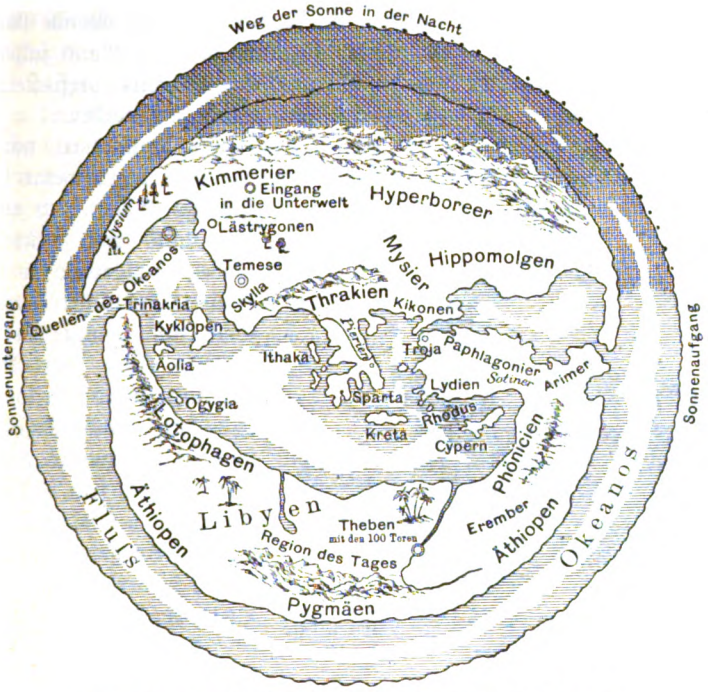
machten ſich auch die Griechen ähnliche myſtiſche Vorſtellungen, wie z. B., daß die Erde eben ſei und von einem gewaltigen Strom Okeanos umfloſſen werde (Fig. 10). Dieſer wurde von der großen Himmelsſchale begrenzt, an welcher die Sterne befeſtigt waren. Die Sonne war ein Loch in der Schale, durch das man das Feuer außerhalb der Schale erblickte. Wurde das Loch verſtopft, ſo hatte man eine Sonnenfinſternis.

Aber ſchon Pythagoras (geb. um 580 v. Chr.) oder jedenfalls ſeine Schule im fünften Jahrhundert war zwar noch der Anſicht, daß die Himmelskörper an einer großen Kriſtallkugelſchale befeſtigt ſeien, die ſich unter einer himmliſchen, aber unhörbaren Muſik dreht, ſprach aber mit Beſtimmtheit aus, daß nicht nur die Sonne und der Mond, ſondern auch die Erde eine

Digitized by Google

Kugel sei. Ja man sprach von Antipoden, d. h. Gegenfüßlern auf der anderen Seite der Erde. Daß selbst das Meer gewölbt sein muß, konnte man ohne weiteres sehen, wenn man ein sich entfernendes Schiff beobachtete (Fig. 11). In einiger Entfernung verschwindet nämlich zuerst der Rumpf und dann nach

Fig. 10.



Griechische mystische Vorstellung vom Flusse Okeanos.

und nach der Mast des Schiffes. Dies ist namentlich leicht in einer so klaren Luft zu beobachten, wie sie in den Mittelmeergegenden nichts Seltenes ist.

Fig. 11.

Ein Schiff verschwindet infolge der Krümmung der Erde.

Da man diese Krümmung nach allen Richtungen hin beobachtet, wie weit man auch reist, schlossen die Griechen, daß sie um die ganze Erde herumgehen müsse.

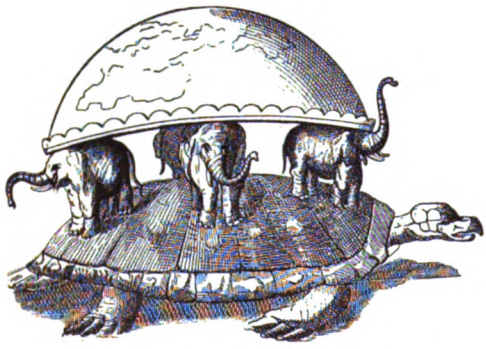
Digitized by Google

Pythagoras kannte auch die Urſache der Verfinſterungen. Wenn der Mond zwiſchen uns und der Sonne ſteht, ſo kann er die Sonne ganz oder teilweiſe verdecken, ſo daß die Soune verfinſtert wird. Dies kann offenbar nur zur Zeit des Neumondes geſchehen, alſo wenn der Mond unſichtbar iſt. Es iſt aber nicht bei jedem Neumond der Fall, weil der Mond in der Regel an unſerer Sehlinie nach der Sonne vorbeigeht.

Wenn dagegen die Erde zwiſchen der Sonne und dem Monde ſteht, alſo zur Zeit des Vollmondes, kann der Erdſchatten auf den Mond fallen, und Pythagoras erkannte, daß dies die Veranlaſſung der Mondverfinſterung iſt. Die meiſten Vollmonde gehen jedoch an dem Erdſchatten vorbei.

Da nun der Erdſchatten auf dem Monde ſtets rund war, mußte die Erde ſelbſt rund ſein, und da dieſes nicht nur der Fall war, wenn der verfinſterte Mond hoch am Himmel ſtand (um Mitternacht), ſondern auch wenn er tief am Himmel im Oſten (kurz nach Sonnenuntergang) oder tief im Weſten (kurz vor Sonnenaufgang) ſtand, ſo konnte die Erde keine runde Scheibe ſein, ſondern ſie mußte rund wie eine Kugel ſein. Denn die Kugel iſt der einzige Körper, der ſtets einen runden Schatten wirft, einerlei von welcher Seite ihn das Licht trifft.

Fig. 12.



Die Unterſtützung der Erde nach der Vorſtellung der Inder.

§ 25. Es bot ſich nun die Frage, wodurch die Erde getragen wird. Die Völker des Altertums hatten dieſe Frage in verſchiedener Weiſe beantwortet. So brachten die Inder als Träger der Erde vier Elefanten an, die ſelbſt wieder auf einer Schildkröte ſtanden (Fig. 12). Ältere griechiſche Philoſophen ließen die Erde auf Waſſer ſchwimmen, welches genau die Hälfte der Himmelskugel füllte, oder auf zuſammengedrückter Luft, oder ſie ließen ſie ihre Wurzeln im Unendlichen haben. Jetzt konnte z. B. Parmenides (ein Zeitgenoſſe des Sokrates) dieſe Frage mit der anderen Frage beantworten: Wohin ſollte die Erde fallen? Sie befindet ſich ja in der Mitte und alles um die Erde herum iſt über der Erde.

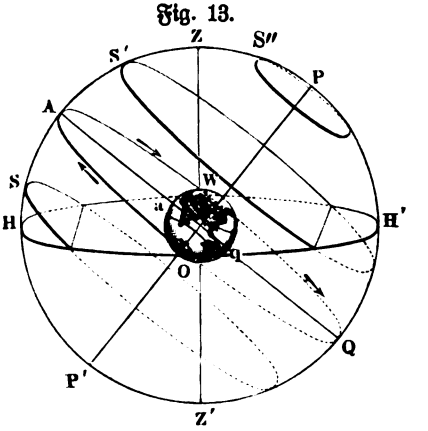
Hiermit wird die Richtung nach unten gleichbedeutend mit der Richtung nach der Mitte der Erde. An jeder Stelle der Erde hat man ſein beſonderes unten (Nadir) und oben (Zenit). Die Menſchen, welche rings herum auf der Erde ſtehen, befinden ſich in Bezug auf die Erde alle in derſelben Stellung. Aber jeder iſt beſtändig geneigt, ſich als obenſtehend zu betrachten und ſein „oben“ als das richtige oben zu betrachten, während er ſich die anderen an den Seiten oder unten und daher nicht als aufrecht ſtehend vorſtellt. Begibt

Digitized by Google

man sich an einen anderen Ort, so überträgt man diese Anschauung sofort auf den neuen Standpunkt.

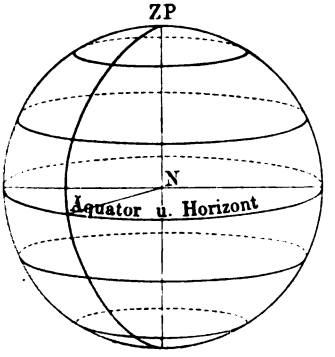
§ 26. Ein Beobachter in unseren Breiten sieht den Nordpol P des Himmels (Fig. 13), den Punkt, um den sich das Himmelsgewölbe scheinbar dreht, zwischen dem Zenit Z und dem Horizont. Er sieht also einige Sterne als Circumpolarsterne, andere mit Tagbogen von größerer oder kleinerer Länge, deren Ebenen aber alle gegen den Horizont geneigt sind. Ein Beobachter dagegen, der sich an derjenigen Stelle der Erde befindet, die „gerade unter" P liegt, d. h. auf dem Nordpol der Erde, hat den Himmelspol vertikal über sich (Fig. 14), und alle Himmelskörper an der nördlichen Halbkugel sind circumpolar und beschreiben horizontale Bahnen. Wenn die Sonne, der Mond oder Planeten auf der nördlichen Halbkugel des Himmels stehen, so sind sie ebenfalls circumpolar mit horizontalen Bahnen. Da sie sich aber dem Nordpol langsam nähern und dann wieder von demselben entfernen, so wird man am Nordpol am Tage des Frühlingsäquinoktiums die Sonne am Horizont erscheinen, um diesen herumgehen und im Laufe eines Vierteljahres in einer Art Spirallinie bis zu einer Höhe von $23\frac{1}{2}^0$ langsam emporsteigen,

Fig. 13.



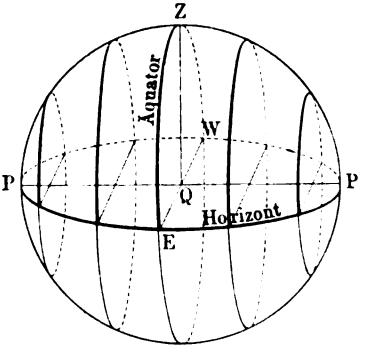
Drehung des Himmels, von einem Ort mittlerer Breite aus gesehen.

Fig. 14.



Drehung des Himmels, vom Nordpol der Erde aus gesehen.

Fig. 15.



Drehung des Himmels, von einem Punkt des Äquators aus gesehen.

im folgenden Vierteljahr wieder herabsteigen und unter dem Horizont verschwinden sehen. Sie bewegt sich dann ein halbes Jahr unter dem Horizont

Digitized by Google

und erzeugt eine Zeitlang nach dem Verschwinden und vor dem Erscheinen eine Dämmerung, die im Laufe eines Tages der Sonne folgend um den Horizont herumgeht.

Endlich gibt es auf der Erde, und zwar auf dem Äquator, Orte, wo man den Nordpol des Himmels im Horizont sieht. Der Südpol des Himmels liegt dann natürlich ebenfalls im Horizont (Fig. 15, a. v. S.). Alle Himmelskörper bewegen sich mit einem Tagbogen von 12 Stunden und einem Nachtbogen von 12 Stunden, einige in größeren, andere in kleineren Kreisen, aber alle so, daß sie senkrecht aufgehen und senkrecht untergehen. Dasselbe gilt von der Sonne. Die Dämmerung ist daher nur von kurzer Dauer.

§ 27. Eine Frage, die sich ganz natürlich bei den Griechen bieten mußte, war die nach der Größe der Erdkugel.

Der erste Schriftsteller, bei welchem wir eine Angabe hierüber finden, ist Aristoteles. Er war 384 v. Chr. in Stagira geboren. Sein Vater war Leibarzt des macedonischen Königs. Im Alter von 18 Jahren begab sich Aristoteles nach Athen, wo er 20 Jahre lang zu den Schülern Platos gehörte. Ungefähr 40 Jahre alt wurde er von Philipp von Macedonien als Erzieher seines Sohnes Alexander angestellt, auf den er einen großen Einfluß gewann. Aristoteles war ein gelehrter und fein gebildeter Mann und ein ausgezeichneter Lehrer. Als Alexander auf den Thron kam, zog Aristoteles wieder nach Athen, wo er eine Schule (die peripatetische) gründete, die von zahlreichen Schülern besucht wurde. Er beherrschte das gesamte Wissen seiner Zeit (Polyhistor), verfaßte zahlreiche Werke über die verschiedensten Gegenstände, und seine Ansichten gewannen großen Einfluß. Obwohl er bei weitem nicht so geistreich war wie Plato, fand seine Naturauffassung viel mehr Anklang, indem er ein ausgezeichneter Systematiker war, der seine Lehren in eine bestechende logische Form einkleidete. Seine naturwissenschaftlichen Erklärungen haben, wie wir sehen werden, durchaus keinen großen Wert, haben aber doch in der Geschichte der Naturwissenschaften eine wichtige Rolle gespielt, indem sie jahrtausendelang zu Streitigkeiten Veranlassung gaben. Er mußte infolge politischer Unruhen Athen verlassen und starb im Jahre 322 auf Euböa in Elend und Einsamkeit. Aristoteles sagt, der Umfang der Erde werde von allen Mathematikern gleich 400 000 Stadien angegeben, aber er sagt nicht, wer ihn ermittelt hat und wie er ermittelt worden ist. Diese Angabe ist zwar ungefähr gleich dem Doppelten des wirklichen Wertes, aber sie scheint doch nicht ganz aus der Luft gegriffen zu sein.

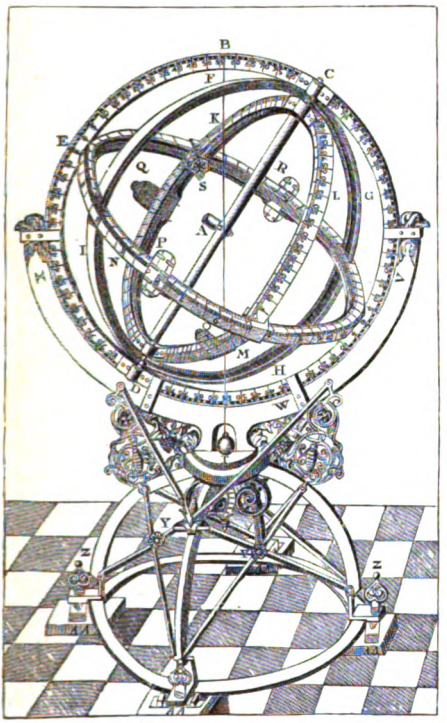
§ 28. Die erste Messung, von der wir sichere Nachricht haben, stammt von Eratosthenes, geb. in Syene in Ägypten 276 v. Chr. Im Jahre 236 wurde er Vorsteher der großen Bibliothek in Alexandria, 195 erblindete er und starb kurz nachher. Einige sagen, er sei aus Verzweiflung über seine Erblindung freiwillig Hungers gestorben.

Eratosthenes konstruierte Instrumente zur Messung von Winkeln, und König Ptolemäus ließ auf seinen Vorschlag auf dem Dache des Museums große prächtige Armillarsphären, d. h. Kugeln anbringen, die aus Ringen

Digitized by Google

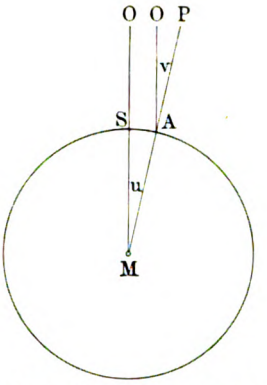
gebildet waren, welche die wichtigsten Kreise am Himmel vorstellten. Eratosthenes wußte nun, daß in Syene ein Brunnen war, auf dessen Boden am Tage der Sommersonnenwende die Sonne schien. In Syene stand also, mit anderen Worten, die Sonne um diese Zeit im Zenit. Eratosthenes

Fig. 16.



Altes Kugelskelett.

Fig. 17.



Messung der Größe der Erde.

fand nun, daß um dieselbe Zeit in Alexandria die Sonne um $^1/_{50}$, d. h. um 7° 12′ südlich von der Vertikallinie stand, und die Entfernung der beiden Orte schätzte er auf 5000 Stadien. Aus diesen Daten berechnete er die Größe der Erdkugel.

Zeichnet man einen Kreis (Fig. 17), der den durch Syene S und Alexandria A gehenden Erdumfang vorstellt, so steht die Sonne senkrecht über S, also in der Richtung MSO. Die Vertikallinie in Alexandria ist MAP, und die Sonne steht in der Richtung AO. Der Winkel $OAP = v$ ist also der Winkel von 7° 15′. Dieser Winkel ist nun ebenso groß wie u, und die Entfernung zwischen Syene, S, und Alexandria, A, ist $^1/_{50}$ des Erdumfanges. Da diese Entfernung 5000 Stadien beträgt, ist der Erdumfang gleich 50×5000 oder 250 000 Stadien.

Nun kennt man allerdings die Länge des griechischen Stadiums nicht ganz sicher, aber doch genau genug, um sagen zu können, daß die Messung des Eratosthenes ziemlich genau war. Das Ergebnis seiner Messung war wahrscheinlich etwas zu groß. Der Umfang der Erde ist 5400 geographische Meilen, der Durchmesser also 1719 und der Radius $859^1/_2$ Meilen.

§ 29. Gleichzeitig mit Eratosthenes lebte Aristarch, geb. um 267 auf Samos.

Digitized by Google

Schon die Pythagoräer hatten von einer Bewegung der Erde um das Zentralfeuer gesprochen, unter dem sie sich wahrscheinlich nicht die Sonne, sondern ein Feuer weit im Süden vorstellten, da es nach dieser Richtung hin immer wärmer wird. Es ist möglich, daß sich diese Lehre später etwas weiter entwickelt hat, allein Aristarch ist doch, wie es scheint, der erste gewesen, der es in unzweideutiger Weise aussprach, daß sich die Erdkugel in einem Tage um ihre Achse dreht und sich in einem „schiefen Kreis" im Laufe eines Jahres einmal um die Sonne bewegt.

Für uns, die wir wissen, wie leicht man sich darüber täuschen kann, ob sich der Eisenbahnzug, in dem man sitzt, bewegt, oder ob sich ein neben ihm stehender Zug in der entgegengesetzten Richtung bewegt, ist es leicht zu verstehen, daß der Anblick derselbe ist, einerlei ob sich der Himmel in der einen oder die Erde in der entgegengesetzten Richtung dreht. Beim Eisenbahnzug kann man aber möglicherweise manche Nebenumstände der Bewegung, das Rumpeln des Wagens, den Übergang aus der Ruhe zur Bewegung und umgekehrt beobachten. Aber bei der Drehung der Erde gibt es kein Rumpeln und keine Veränderung der Bewegung.

Anderseits muß jedoch bemerkt werden, daß Aristarch einen Beweis für die Drehung der Erde nicht geliefert hat. Daß die vom Himmel umschlossene kleine Erde sich bewegt und der große umschließende Himmel in Ruhe ist, hielt er für wahrscheinlicher als das Umgekehrte.

§ 30. Die andere Behauptung Aristarchs, nämlich daß sich die Erde in einem schiefen Kreise um die Sonne bewegt, erklärt vollständig die Wanderung der Sonne in der Ekliptik. In Fig. 18 bezeichnet *A*, *B*, *C*, *D* beziehungsweise die Stellung der Erde im Frühling, Sommer, Herbst und Winter. Wenn wir uns wirklich um die Sonne bewegen, so müssen wir nach und nach die Sonne in den verschiedenen Richtungen erblicken, in denen wir die Sternbilder des Tierkreises sehen, während die Sonne immer an derselben Stelle bleibt.

Auch die Wanderung der Sonne vom Äquator aus nordwärts und südwärts ist leicht zu erklären. Zur Zeit des Frühlingsäquinoktiums, *A*, steht die Sonne im Erdäquator. Sie wird also von der Erde aus am Himmel in der Richtung von Sternen gesehen, die im Himmelsäquator stehen. An jedem Orte der Erde ist die Sonne einen halben Tag lang sichtbar. Zur Zeit des Sommersolstitiums, *B*, steht die Sonne nördlich vom Äquator. Ihre Strahlen fallen (mittags) vertikal auf den nördlichen Wendekreis (Wendekreis des Krebses, da die Sonne dann in diesem Sternbilde steht). An allen Orten, die innerhalb des nördlichen Polarkreises liegen, ist die Sonne den ganzen Tag sichtbar. Innerhalb des südlichen Polarkreises ist sie den ganzen Tag unsichtbar. Zur Zeit des Herbstäquinoktiums, *C*, steht die Sonne wieder im Äquator, und es ist überall Tag- und Nachtgleiche. Zur Zeit des Wintersolstitiums steht die Sonne südlich vom Äquator. Sie steht für die Bewohner des südlichen Wendekreises (des Steinbocks) mittags im Zenit. In den

Digitized by Google

nördlichen Polargegenden ist die Sonne gar nicht, in den südlichen den ganzen Tag sichtbar.

§ 31. Gegen die Bewegung der Erde um die Sonne könnte man einwenden, daß diese Bewegung erhebliche Verschiebungen am Fixsternhimmel zur Folge haben müsse, daß z. B. die Sternbilder am größten sein müßten, wenn ihnen die Erde am nächsten steht, oder daß der Polarstern nicht unverändert in der Verlängerung der Erdachse stehen könne, sondern daß er etwas nach der Seite hin stehen müsse, auf der die Sonne steht. Dieser Einwand ist allerdings gegen dieses sogenannte „Kopernikanische System" noch bis in die neuere Zeit hinein erhoben worden, und doch hat bereits Aristarch die richtige Erklärung gegeben, indem er sagt: Die ganze Erdbahn um die Sonne ist im Verhältnis zum Fixsternhimmel so klein wie der Mittelpunkt einer Kugel im Verhältnis zur Kugel selbst. Aristarchs großer Zeitgenosse Archimedes (§ 116) kritisiert allerdings diesen Ausdruck, da ein Punkt zu einer Kugel überhaupt in keinem Verhältnis stehe. Allein wie treffend der bildliche Ausdruck Aristarchs war, das beweisen die vergeblichen Versuche zweier Jahrtausende, die Entfernung der Fixsterne zu ermitteln.

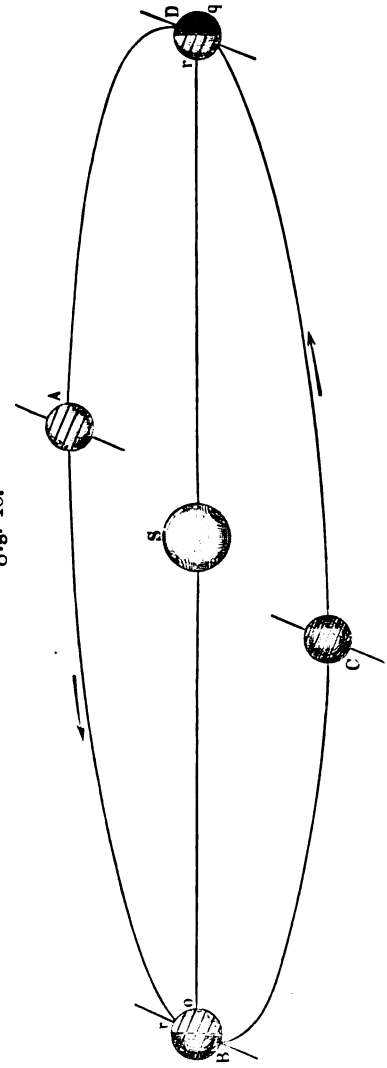


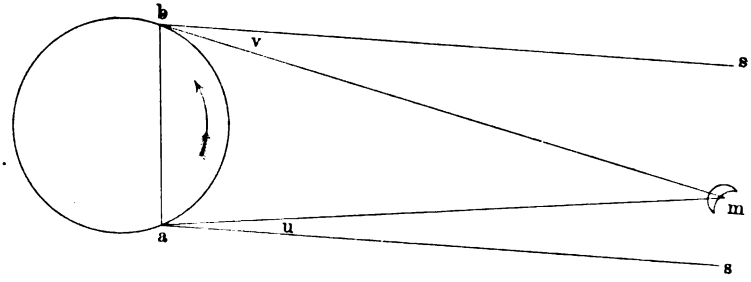
Fig. 18. Die Erde in ihrer Bahn um die Sonne.

§ 32. Ferner ermittelte Aristarch auch die Entfernungen des Mondes und der Sonne. Er bediente sich derselben Methode, durch die Thales die Entfernung eines Schiffes ermittelte (§ 23). Die Ausführung bietet hier allerdings größere Schwierigkeiten. Selbst der Mond ist schon so weit entfernt, daß eine Standlinie (gegenseitige Entfernung der beiden Beobachter) von einigen Kilometern oder einigen Meilen nicht hinreichend ist. Bei größerer Entfernung können sich aber die beiden Beobachter wegen der Kugelgestalt der Erde nicht sehen und sie können daher nicht aufeinander visieren.

Digitized by Google

Außerdem war die Ausführung weiter Reisen damals mit viel größeren Schwierigkeiten verbunden als heute. Deshalb vereinigte Aristarch sozusagen beide Beobachter in seiner eigenen Person. Er beobachtete zuerst an dem Orte, an dem er war, und reiste dann einfach durch die Drehung der Erde nach demjenigen Punkte des Raumes, in dem sich zur Zeit seiner Beobachtung der gegenüberliegende Punkt der Erdoberfläche befand. Aristarch befindet sich, mit anderen Worten, während sich die Erde in der Richtung des Pfeiles dreht (Fig. 19), zuerst im Punkt *a* und beobachtet den aufgehenden Mond. Da

Fig. 19.



Messung der Entfernung des Mondes von der Erde.

er aber nach dem Punkt *b*, wohin er nach 12 Stunden kommt, nicht visieren kann, benutzt er einen Stern in der Richtung *s* und mißt, wieviel Grad es vom Mond *m* bis zu diesem Stern *s* sind, d. h. er mißt den Winkel *u*. Wenn er dann durch die Bewegung der Erde nach dem Punkt *b* gekommen ist, so daß der Mond jetzt für ihn untergeht, mißt er wieder den Abstand des Mondes von dem Stern, d. h. den Winkel *v*. — Da *s* als unendlich entfernt angesehen werden kann, sind die beiden Linien *as* und *bs* parallel. Kennt man also die Länge der Standlinie *ab*, so kann man die Aufgabe leicht durch Zeichnung lösen. Man zieht von *a* und *b* aus parallele Linien, die die Sehlinien nach dem Stern vorstellen, und setzt die gemessenen Winkel *u* und *v* an diese Linien an. Man erhält so die Stelle, an der sich der Mond befindet, und die Entfernung *am* desselben kann mit der Standlinie *ab* gemessen werden.

Die Sache ist jedoch nicht ganz so einfach, wie es nach dem Gesagten scheinen könnte. Zunächst mußte Aristarch aus der bekannten Größe der Erde und der Lage des Ortes *a* den Abstand der Punkte *a* und *b* ermitteln. Dazu kommt, daß der Mond in den 12 Stunden nicht stillsteht. Da jedoch Aristarch wußte, um wieviel der Mond in einem Tage nach Osten fortschreitet, konnte er von den beiden Sehlinien nach dem aufgehenden und dem untergehenden Mond die letztere der in der Zwischenzeit erfolgten Verschiebung des Mondes entsprechend abändern.

Aristarch fand so, daß die Entfernung des Mondes von der Erde gleich 56 Erdhalbmessern sei, was der Wirklichkeit ziemlich nahe kommt.

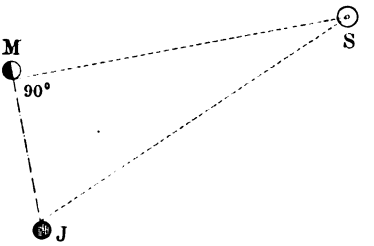
§ 33. Endlich versuchte Aristarch die Entfernung der Sonne von der

Digitized by Google

Erde zu messen. Dies ist noch schwieriger, weil die Sonne so weit entfernt ist, daß selbst der Durchmesser der Erde als Standlinie zu klein ist. Er erkannte jedoch, daß die Entfernung des Mondes von der Erde als Standlinie dienen könne, indem er sich einen Beobachter auf dem Monde dachte, der nach der Sonne und der Erde visiert, während er selbst auf der Erde nach der Sonne und dem Monde visierte.

Aristarch beobachtete nämlich zur Zeit der Mondviertel, d. h. wenn die Hälfte der der Erde zugewandten Seite des Mondes beleuchtet ist. Ein Beobachter, der sich in diesem Augenblicke in der Mitte dieser Seite befände, würde dann die Erde im Zenit und die Sonne im Horizont haben. Die Sehlinien dieses Beobachters nach der Sonne und der Erde bilden also einen Winkel von 90°. Hatte nun Aristarch den Winkel zwischen seinen beiden Sehlinien gemessen (er fand 87°), so konnte er das Dreieck MJS (Fig. 20) zeichnen und die Entfernung der Sonne durch Messung ermitteln. Er fand, daß die Sonne 19 mal so weit entfernt sei als der Mond.

Fig. 20.



Messung der Entfernung der Sonne von der Erde.

Die Methode ist zwar in hohem Grade sinnreich, aber sie kann nicht leicht ein genaues Resultat liefern. Die Sonne ist sovielmal (400) weiter entfernt als der Mond, daß die Entfernung des Mondes von der Erde als Standlinie nur unter der Voraussetzung gebraucht werden kann, daß die Winkelmessung im Augenblick der Viertelstellung höchst genau ausgeführt wird. Die Grenze zwischen dem beleuchteten und dem nichtbeleuchteten Teil des Mondes ist aber so unregelmäßig, daß wir diesen Augenblick selbst mit Hilfe des Fernrohres nicht genau bestimmen können. Der Fehler kann mehrere Stunden betragen.

§ 34. Wenn man die Entfernungen des Mondes und der Sonne von der Erde kennt, ist es verhältnismäßig leicht, die Größe dieser Himmelskörper zu finden. Bringt man eine kleine runde Scheibe in eine solche Entfernung vom Auge, daß sie den Mond gerade bedeckt, so kann man offenbar sagen, daß der Durchmesser des Mondes so viel mal größer ist als der Durchmesser der Scheibe, als die Entfernung des Mondes größer ist als die Entfernung der Scheibe. Die Größe des Mondes läßt sich also leicht vermittelst einer Proportion berechnen. Nach Aristarch ist der Durchmesser des Mondes $^{19}/_{60}$ (fast $^1/_3$) des Erddurchmessers. Der wirkliche Durchmesser ist jedoch nur wenig mehr als $^1/_4$ des Erddurchmessers. Der Fehler in dieser Angabe ist demnach größer als der Fehler in der Entfernung, doch ist er vielleicht auf einen Schreibfehler zurückzuführen.

Da Aristarch die Entfernung der Sonne zu klein gefunden hatte, fand er natürlich auch für die Größe der Sonne einen zu kleinen Wert.

Digitized by Google

§ 35. Aristarch wurde von Kleanthes der Gottlosigkeit beschuldigt und mußte Athen verlassen. Er sollte durch seine Behauptung, daß sich die Erde bewege, den Frieden der Erdgöttin Hestia gestört haben. Nachdem Nikolaus Kopernikus über 1700 Jahre später dieselbe Lehre von neuem aufgestellt hatte, wurden auch wieder religiöse Einwendungen gegen sie erhoben, und sie verlangte wieder ihre Opfer, wenn sie auch diesmal nicht wieder unterdrückt wurde. Die Erkenntnis, daß die Erde eine durch den Raum hinfliegende Kugel ist, bezeichnete also eine nicht unbedeutende Umwälzung in dem ganzen Vorstellungskreise der Menschheit. Man kann die Frage nicht unterdrücken, ob es wirklich das Schicksal Aristarchs gewesen ist, was die Sache in ihrem Laufe gehemmt hat. Dies ist sehr unwahrscheinlich, da in jener Zeit der Glaube der Griechen an die alten Götter doch keine große innere Kraft mehr hatte, aber Tatsache bleibt es auf alle Fälle, daß die genialen Gedanken Aristarchs beiseite gelegt und nach und nach von der nüchternen Anschauung abgelöst wurden, daß die Erde stillstehe und alles andere sich um sie drehe.

§ 36. Dagegen folgt im Jahrhundert nach Aristarch ein Astronom, dessen Beobachtungen, Instrumente und Arbeiten alles überragen, was früher in dieser Richtung geleistet worden war. Dieser Astronom ist Hipparch von Nikäa. Seine Tätigkeit fällt zwischen 160 und 125 v. Chr. Er hielt sich zeitweise in seiner Geburtsstadt, zeitweise auf der Insel Rhodos auf, die damals zum ägyptischen Reich gehörte, vorübergehend vielleicht auch in der Hauptstadt Alexandria.

Hipparch wiederholte die Messung der Entfernung des Mondes und fand, daß sie durchschnittlich gleich 59 Erdradien, aber nicht immer gleich groß sei. Ferner fand er, daß sich der Mond nicht immer mit derselben Geschwindigkeit bewegt, sondern am schnellsten, wenn er der Erde am nächsten ist. Den Durchmesser des Mondes fand er richtig gleich $^3/_{11}$ des Erddurchmessers.

Die Entfernung der Sonne suchte er aus der Größe des Erdschattens auf dem Monde zu bestimmen. Da dieser Schatten aber nicht scharf begrenzt ist, fiel seine Bestimmung nicht genauer aus als die von Aristarch ausgeführte (Sonne 20mal so weit entfernt als der Mond).

§ 37. Um genau visieren zu können, benutzte Hipparch ein Fadenkreuz, und um störendes Seitenlicht abzuhalten, brachte er dieses in einem Rohre an, das also eine gewisse äußere Ähnlichkeit mit unseren heutigen Fernrohren hatte.

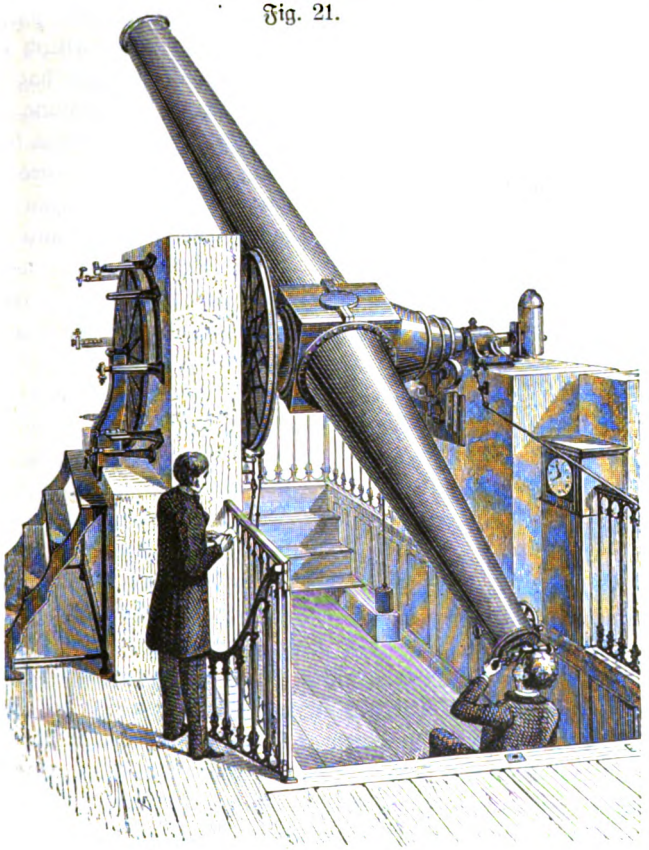
Die früher gebräuchliche Bestimmung der Sternorte durch Beobachtung des Aufganges und des Unterganges verwarf er als ungenau und führte Messungen mit einem sogenannten Meridianinstrument ein. Da wir die von Hipparch benutzten Instrumente nicht genau kennen, ist in Fig. 21 ein modernes Meridianinstrument abgebildet. Es ist auch jetzt noch ein sehr wichtiges Instrument für ähnliche Beobachtungen wie die, welche Hipparch mit seinem Instrument ausführte. Das Fernrohr ist so aufgestellt, daß es

Digitized by Google

sich um eine genau von Osten nach Westen gerichtete Achse dreht. Das Fernrohr bewegt sich also im Meridian des Ortes, d. h. in einer vertikalen Ebene, die von Norden nach Süden gerichtet ist.

§ 38. Die Arbeit, für welche die Nachwelt Hipparch ganz besonders zu Dank verpflichtet ist, ist ein sorgfältiger Katalog über 1022 Fixsternorte.

Fig. 21.



Ein modernes Meridianinstrument.

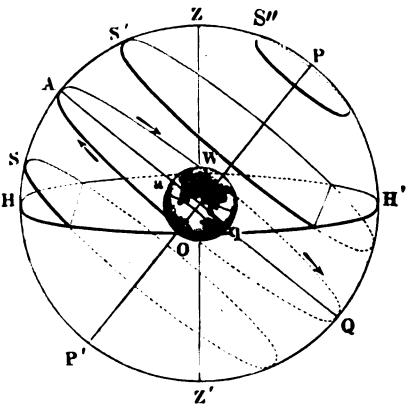
Dies ist der älteste und bis zur Zeit Tycho Brahes der genaueste Sternkatalog. Er ist sowohl wegen seines Alters, als auch wegen seiner Genauigkeit von unschätzbarem Werte, da er uns darüber belehrt, wie die Sterne vor 2000 Jahren standen. Sehr bemerkenswert ist es, daß es ein neu aufleuchtender Stern gewesen sein soll, der Hipparch veranlaßte, diesen Katalog zu bearbeiten, damit man in Zukunft sehen könne, ob neue Sterne auftauchten. Es war ebenfalls ein neuer Stern, der Tycho Brahe veranlaßte, eine ähnliche Arbeit zu unternehmen.

Digitized by Google

Wenn man mit dem Meridianinstrument die Höhe $S'H$ (Fig. 22) eines Sternes im Meridian gefunden hat, so braucht man von dieser nur die Höhe AH des Äquators abzuziehen, um den Abstand des Sternes vom Äquator AS', die sogenannte **Deklination**, zu erhalten. Hiermit ist die Ortsbestimmung für den Stern zum Teil ausgeführt. Der Stern steht jetzt nämlich auf einem Kreis, dessen Abstand vom Pol oder vom Äquator bekannt ist. Wenn aber der Ort eines Sternes vollkommen bestimmt sein soll, so muß man zugleich angeben, wie weit jeder Stern östlich oder westlich von einem bestimmten Stern steht, den man als Ausgangspunkt gewählt hat.

Seit der Zeit **Tycho Brahes** wird diese letztere Bestimmung vermittelst der Uhr ausgeführt. Man beobachtet den Zeitunterschied zwischen dem Durchgang desjenigen Sternes durch den Meridian, den man zum Ausgangspunkt gewählt hat, und desjenigen, dessen Ort bestimmt werden soll. Geht der letztere z. B. eine Stunde später durch den Meridian, so steht er um so viel östlicher als der erstere, als sich der Himmel in einer Stunde dreht, d. h. um $^1/_{24}$ von 360° oder 15°. Es ist gleichgültig, ob man sich die 15° auf dem Kreise $C\,C'\,C''$ oder auf dem Äquator denkt. In der Regel denkt man sich den „Stundenwinkel" auf dem letzteren angebracht. Der Ort eines Sternes ist also durch seinen Stundenwinkel und seine Deklination bestimmt. Statt durch den veränderlichen Stundenwinkel wird der Ort eines Sternes in den Katalogen in der Regel durch den östlichen Winkelabstand von einem festen Punkt, dem Widderpunkt oder Frühlingspunkt, angegeben. Dieser Winkelabstand heißt **Rektaszension**.

Fig. 22.



Bestimmung eines Sternortes.

In dieser Weise konnte jedoch **Hipparch** den Stundenwinkel nicht finden, da die Zeitbestimmungen damals zu unsicher waren. Er mußte daher den ostwestlichen Abstand der Sterne mit einem Winkelmeßinstrument (Sextant) direkt messen. Wie seine Instrumente aussahen, wissen wir nicht, aber der Katalog läßt darauf schließen, daß sie sehr genaue Messungen ermöglichten.

§ 39. Auch den Ort des Mondes und der Planeten konnte **Hipparch** jederzeit in derselben Weise bestimmen. Die Meridianhöhe gab ihm die Deklination, und die Messung des Winkelabstandes von einem bekannten Stern die Rektaszension.

Auch die Meridianhöhe der Sonne konnte in derselben Weise bestimmt werden. Allein da die Sonne nicht gleichzeitig mit den Fixsternen sichtbar ist, so konnte der Abstand der Sonne von einem Fixstern nicht direkt gemessen werden. **Hipparch** benutzte daher den Mond als Zwischenglied. Vor

Digitized by Google

Sonnenuntergang maß er den Abstand der Sonne vom Mond, und nach Sonnenuntergang den Abstand des Mondes von einem Stern. War z. B. der erstere 35° und der letztere 17°, so war der Abstand der Sonne von dem Stern 52°, wenn beide Messungen in derselben Richtung ausgeführt wurden und wenn der Mond in der Zwischenzeit keine Eigenbewegung gemacht hätte. Da das letztere aber unter allen Umständen der Fall war, so mußte Hipparch das Ergebnis einer solchen Messung berichtigen, und er führte diese Berichtigung so genau aus, daß er erkannte, daß die Bewegung der Sonne im Laufe des Jahres keine gleichförmige ist. Dieser Umstand hat aber zur Folge, daß die Sonne kein ganz regelmäßiger Zeiteinteiler ist. Wir wollen dies etwas näher betrachten.

§ 40. Die Umdrehung des Sternhimmels (d. h. der Erde) ist vollkommen gleichförmig. Die Zeit einer solchen Umdrehung ist ein Sterntag. Die astronomischen Uhren werden gewöhnlich so reguliert, daß sie Sternzeit angeben.

Da die Sonne jeden Tag etwas nach Osten fortschreitet, ist die Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Durchgängen der Sonne durch den Meridian etwas länger (etwa 4 Minuten) als ein Sterntag. Diese Zeit ist der sogenannte wahre Sonnentag. Da sich nun, wie Hipparch fand, die Sonne nicht immer gleich schnell in der Ekliptik bewegt, so ändert sich allein aus diesem Grunde die Länge der Sonnentage im Laufe des Jahres. Dazu kommt noch, daß der Weg der Sonne in der Ekliptik nicht immer genau nach Osten gerichtet ist. Zur Zeit der Tag- und Nachtgleiche ist die Sonnenbahn ziemlich stark gegen den Äquator geneigt, die Sonne rückt nicht stark nach Osten vor und die Sonnentage werden kürzer. Zur Zeit der Sonnenwende dagegen bewegt sich die Sonne annähernd dem Äquator parallel. Jetzt legt die Sonne in ihrer Bewegung nach Osten so viel mehr zurück, als ein Grad der Sonnenbahn größer ist als ein Grad desjenigen Parallelkreises, auf dem sich die Sonne augenblicklich bewegt.

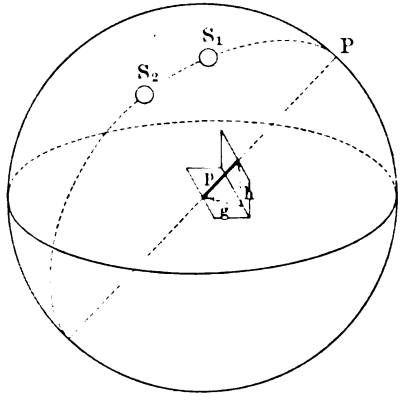
Im bürgerlichen Leben kann man jedoch Tage von verschiedener Länge nicht gut brauchen, denn die Uhren müssen einen gleichförmigen Gang haben. Man hat daher noch eine dritte Art von Tag, den mittleren Sonnentag. Denkt man sich, es bewege sich eine Sonne gleichförmig auf dem Äquator so, daß sie im Laufe des Jahres einen Umlauf macht, so ist der mittlere Sonnentag die Zeit von einem Durchgang dieser Sonne durch den Meridian bis zum nächstfolgenden. Nach dieser gedachten Sonne gehen unsere Uhren. Sie zeigen daher nicht immer 12, wenn die wirkliche Sonne im Meridian (im Süden) steht. Der Kalender enthält eine Tabelle, welche für die verschiedenen Zeiten des Jahres angibt, wieviel Uhr es ist, wenn die Sonne im Süden steht (die Abweichung heißt die Zeitgleichung). Der bürgerliche Mittag fällt daher in der Regel nicht mitten zwischen Sonnenaufgang und Sonnenuntergang. Ein Blick in den Kalender zeigt, daß Vormittag und Nachmittag gewöhnlich verschiedene Länge haben. Vor Neujahr z. B. ist der Nachmittag kürzer, nach Neujahr der Vormittag.

Digitized by Google

§ 41. Die Völker des Altertums bedienten sich der Sonnenuhr (griech. Gnomon), an der man aus dem Schatten eines Stabes ersehen konnte, wieviel Uhr es ist. Anfangs hat man, wie es scheint, einen vertikalen Stab als Schattenwerfer benutzt. Einige nehmen an, daß die ägyptischen Obelisken zu diesem Zwecke gedient haben. An manchen Orten hat man wahrscheinlich die Länge, an anderen dagegen die Richtung des Schattens benutzt. Allein in beiden Fällen wird eine Sonnenuhr, die zu einer Zeit des Jahres richtig ist, es nicht zu einer anderen Zeit sein.

Wenn eine Sonnenuhr zu jeder Jahreszeit richtig sein soll, so muß der Stab, welcher den Schatten wirft, gegen den Nordpol des Himmels gerichtet sein. Zu jeder beliebigen Stunde (z. B. um 2 Uhr nachmittags) wird nämlich die Sonne in dem entsprechenden Deklinationskreise PS_1S_2 (Fig. 23) sein, und der Stab wird einen Teil des Durchmessers dieses Kreises bilden. Der Schatten des Stabes p muß also in die Ebene des genannten Kreises fallen, und wo die Ebene S_2S_1Pp die Ebene der Sonnenuhr schneidet, wird der Schatten von p sein, einerlei ob sich die Ebene in horizontaler (g), vertikaler (h) oder in irgend einer anderen Lage befindet. Der Schatten entsteht also immer an derselben Stelle, einerlei ob die Sonne in S_1 oder in S_2 steht, also zu jeder Jahreszeit, sobald sie nur in dem der betreffenden Zeit (2 Uhr) entsprechenden Deklinationskreise steht.

Fig. 23.



Einrichtung der Sonnenuhr.

§ 42. Ferner bestimmte Hipparch mit außerordentlicher Genauigkeit die Länge des Jahres, und hierdurch wurde er zu weiteren Entdeckungen geführt.

Vor der Zeit Hipparchs hatte man die Länge des Jahres dadurch bestimmt, daß man von dem Tage an, an welchem im Sommer die Sonne am höchsten stand, die Anzahl der Tage zählte, bis die Sonne wieder in diese Stellung kam. Nun ist aber diejenige Stelle der Ekliptik, an der sich die Sonne zur Zeit der Sonnenwende befindet, annähernd dem Äquator parallel. Daher erreicht um diese Zeit die Sonne mehrere Tage fast dieselbe Höhe. Der Unterschied war für die Instrumente der damaligen Zeit so unmerklich, daß es durch die Beobachtungen eines einzigen Jahres nicht entschieden werden konnte, an welchem Tage die Sonne den nördlichsten Punkt ihrer Bahn erreicht. Noch viel weniger konnte man die Stunde bestimmen, um die sich die Sonne in dieser Stellung befindet. Wenn die Völker des Altertums trotzdem die Länge des Jahres recht gut kannten, so hat dies seinen Grund darin, daß sie langjährige Beobachtungen besaßen. Wenn man

Digitized by Google

sich auch in einem einzelnen Jahre um einige Tage irren kann, so ist dieser Fehler doch nicht sehr groß, wenn er sich auf eine längere Reihe von Jahren verteilt.

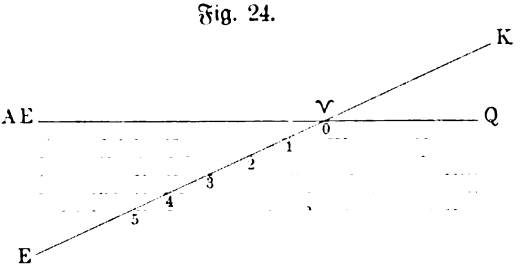
Hipparch erkannte nun, daß sich die Zeit der Tag- und Nachtgleiche zur Bestimmung der Jahreslänge bedeutend besser eignet. Zur Zeit des Frühlingsäquinoktiums z. B. bewegt sich die Sonne an der Stelle, wo die Ekliptik den Äquator schneidet, von Tag zu Tag sehr merklich nach Norden. Steht die Sonne am 21. März mittags 7′ südlich vom Äquator, so steht sie am folgenden Tage mittags 17′ nördlich vom Äquator. Dieser Unterschied von 24′ ist leicht zu erkennen und mit dem Meridianinstrument zu messen. Aus der Beobachtung ergibt sich dann nicht nur, daß die Tag- und Nachtgleiche auf den 21. oder 22. März gefallen ist, sondern, weil die Sonne ungefähr in jeder Stunde 1′ nach Norden fortgeschritten ist, daß sie am 21. März abends 7 Uhr den Äquator passiert hat.

Im nächsten Jahre und in den folgenden Jahren kann der Durchgang der Sonne durch den Frühlingspunkt mit derselben Genauigkeit bestimmt werden, und je größer die Anzahl der Beobachtungen wird, desto geringer wird der Fehler. So fand Hipparch die Länge des Jahres gleich $365^d\ 5^h\ 55^m$, nur um 6 Minuten zu groß.

§ 43. Hipparch begnügte sich aber nicht damit, den Augenblick zu bestimmen, in welchem die Sonne den Äquator schneidet, sondern er suchte zugleich die Stelle unter den Fixsternen zu ermitteln, wo dieses stattfindet. Er hat wahrscheinlich einige Unsicherheit oder Veränderlichkeit in diesem Durchschnittspunkt gefunden, denn er zog bei dieser Arbeit auch die Bestimmungen älterer Astronomen heran, die allerdings weniger genau, dafür aber älter waren, so daß er aus ihnen entnehmen konnte, wie sich die Sache vor längerer Zeit verhalten hatte.

Dabei gelang es ihm, eine sehr merkwürdige Entdeckung zu machen, nämlich daß der Äquator die Ekliptik jedes Jahr an einer etwas anderen Stelle schneidet. Ist EK (Fig. 24) die Ekliptik und AE der Äquator, so trifft die Sonne auf ihrer Wanderung von E nach K den Äquator z. B. im Punkt 0. Im nächsten Jahre ist der Äquator der Sonne ein kleines Stück entgegengekommen, und die Sonne schneidet den Äquator im Punkt 1, das folgende Jahr im Punkt 2, u. s. w. Der Frühlingspunkt verschiebt sich also auf der Ekliptik fortwährend in der Richtung nach Südwesten. Es ist nur eine kleine Verschiebung, denn der Frühlingspunkt braucht 26 000 Jahre, um einen vollen Umlauf um die Ekliptik zu machen. Um so mehr Ehre

Fig. 24.



Verschiebung des Frühlingspunktes.

Digitized by Google

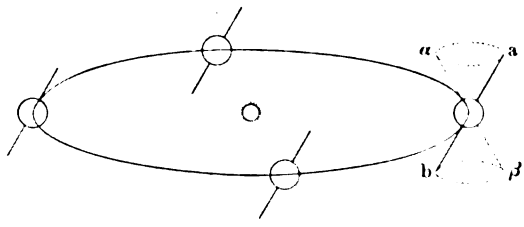
gebührt Hipparch, der diese langsame, aber großartige Erscheinung, die sogenannte Präzession der Äquinoktialpunkte, entdeckte.

Das tropische Jahr, welches Hipparch bestimmt hatte, ist also die Zeit, welche die Sonne braucht, um knapp einen vollen Umlauf zu machen, nämlich vom Punkt 0 aus herum bis zum Punkt 1. Um bis zum Punkt 0, also bis an dieselbe Stelle unter den Sternen zurückzukehren, braucht die Sonne nur wenig Zeit mehr. Für diese Zeit, das siderische Jahr, fand Hipparch $365^d\,6^h\,14^m$ (nur 4 Minuten zu viel).

§ 44. Hipparch war der beobachtende und messende Astronom. Auf theoretische Erklärungen hat er sich nicht eingelassen, und Ptolemäus (§ 55) sagt von ihm, er habe es unterlassen, eine Theorie der Planetenbewegung zu geben, um seinen Ruhm nicht zu gefährden. Dies deutet auf jeden Fall darauf hin, daß sich Hipparch wohl bewußt war, welches Gewicht in der Naturforschung die Tatsachen besitzen. Aber nach der Entdeckung der Präzession muß die Erklärung Aristarchs etwas abgeändert werden.

Da sich die Ekliptik nicht verändert, muß die Ebene der Erdbahn unveränderlich sein [1]). In Fig. 25 stellt die horizontale Ellipse die Erdbahn und ab sowie die dazu parallelen Linien die Erdachse vor. Während nach der Ansicht Aristarchs die Erdachse immer gegen die Erdbahn nach derselben Richtung hin geneigt sein sollte, sehen wir nun, daß die Erdachse nicht immer sich selbst parallel bleibt, sondern daß sie sich im Laufe der Jahrtausende nach anderen Richtungen neigt, so daß der Himmelspol einen Kreis um den Pol der Ekliptik beschreibt. Wir können dieselbe Erscheinung im kleinen an einem Kreisel beobachten, der sich um seine Achse dreht, indem diese zu gleicher Zeit einen Kegelmantel beschreibt.

Fig. 25.



Die Bewegung der Erdachse in 26 000 Jahren.

Wenn jetzt die Erdachse die Richtung ab hat, so wird sie nach 13 000 Jahren die Richtung $\alpha\beta$ haben. Wenn dann Sommer ist, so wird man die Sonne an derselben Stelle des Tierkreises sehen, wo wir sie jetzt im Winter sehen. Auch die Neigung der Achse bleibt nicht immer dieselbe, denn

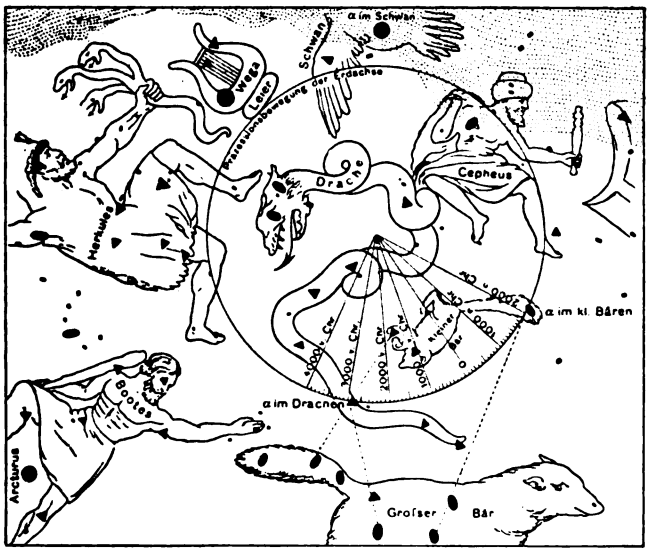
[1]) Daher bezog auch Hipparch den Ort eines Sternes nicht, wie es früher üblich gewesen war, auf den Äquator, sondern auf die Ekliptik. Da sich nämlich die Lage des Äquators ändert, ändert sich auch die Stellung eines Sternes in Bezug auf diesen, d. h. die Deklination und die Rektaszension. Der Abstand eines Sternes von der Ekliptik heißt seine Breite, der Abstand des Fußpunktes der Breite auf der Ekliptik vom Frühlingspunkt die Länge. Die erstere ist unveränderlich, die letztere ändert sich, aber in einer einfachen und gleichförmigen Weise.

Digitized by Google

die Achse bewegt sich nicht genau in einem Kreise. Gegenwärtig nimmt sie in jedem Jahrhundert um 50″ ab.

Die Erdachse deutet also im Laufe der Jahrtausende nach und nach immer auf andere Sterne, und der Weltpol beschreibt infolgedessen unter den Sternen einen Kreis (Fig. 26). Der heutige Polarstern wird im Laufe der

Fig. 26.



Die Wanderung des Nordpols in 26000 Jahren.

Zeit von anderen Sternen abgelöst werden, die jetzt noch weit vom Pol entfernt sind. Nach 10000 Jahren wird Wega Polarstern sein.

§ 45. Von älteren Griechen hatte namentlich Anaximander (611 bis 545 v. Chr.), der Nachfolger des Thales als Führer der jonischen Schule, versucht, Landkarten auf Kupfertafeln zu zeichnen. Wenn diese Arbeit jedoch mit einiger Genauigkeit ausgeführt werden und sich über einen nicht zu kleinen Teil der Erdkugel erstrecken soll, so sind astronomische Beobachtungen dazu unentbehrlich. Einzelnes, was dabei in Betracht kommt, wußte man vor der Zeit Hipparchs, so z. B. daß der Polarstern um so höher am Himmel erscheint, je weiter man nach Norden kommt. Ebenso hat man es jedenfalls seit der Zeit Aristarchs verstanden, daß zwei Orte, die in der Richtung von Osten nach Westen weit voneinander entfernt liegen, nicht gleichzeitig Mittag haben. Allein Hipparch scheint der erste gewesen zu sein, der die Lage eines Ortes auf der Erde durch astronomische Beobachtungen bestimmte.

Hipparch war sich selbstverständlich klar bewußt, daß es nur ein kleines Stück der Erdoberfläche war, was man zu seiner Zeit kannte. Während er für den Umfang der Erde 275000 Stadien angibt, schätzt er die Länge der

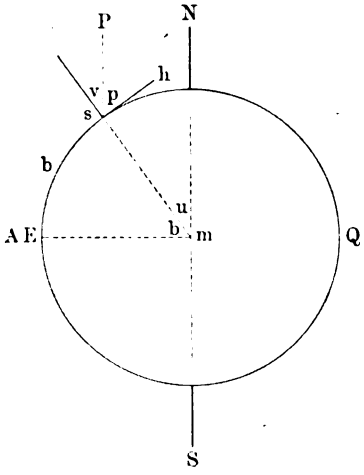
Digitized by Google

bekannten bewohnten Länder auf 70000 und die Breite vom Äquator bis Thule auf 46200 Stadien. Die von ihm eingeführte Art, die Lage eines Ortes zu bezeichnen, besteht darin, daß dessen Abstand vom Äquator und dessen Abstand in östlicher oder westlicher Richtung von einem festen Punkt angegeben wird. Den ersteren Abstand nannte er die **Breite**, den letzteren die **Länge** des Ortes. Der damals bekannte Teil der Erdoberfläche hatte nämlich seine Länge in der Richtung von Osten nach Westen und seine Breite von Norden nach Süden.

§ 46. Die Bestimmung der geographischen Breite eines Ortes besteht darin, daß man an diesem Orte die Polhöhe mißt. Diese ist nämlich, wie leicht einzusehen ist, genau so groß wie der Abstand des Ortes vom Äquator.

Der Kreis in Fig. 27 stellt die Erde, NS die Achse derselben und AEQ den Äquator vor. Für den Ort s ist sP die Richtung nach dem Weltpol, sh der Horizont und ms die Vertikallinie. Diese letztere Linie bildet gleiche Winkel mit den Parallelen sP und mN. Daher sind die Winkel v und u und folglich auch die Winkel p (Polhöhe) und b (Breite) gleich.

Fig. 27.



Gleichheit von Polhöhe und geographischer Breite.

Stände nun der Polarstern genau im Pol, so brauchte man auf einer Reise nur die Höhe desselben zu messen, und man hätte genau die Breite des Ortes. Der Seemann, für den die Bestimmung der Breite von großer Wichtigkeit ist, benutzt jedoch zu dieser Bestimmung oft die Sonne. Diese bewegt sich um die Mittagszeit parallel dem Horizont. Es ist daher nicht nötig, daß die Höhe der Sonne in dem Augenblick gemessen wird, wenn die Sonne genau im Süden steht. Dieser Augenblick ist auf der See, wo man keine feste Nordlinie hat, schwer zu bestimmen. Hat man die Höhe der Sonne, so entnimmt man aus dem nautischen Jahrbuch die Poldistanz der Sonne für den betreffenden Tag und addiert die beiden Winkel. Die Polhöhe des Ortes erhält man dann, indem man die erhaltene Summe von 180° abzieht (Fig. 2).

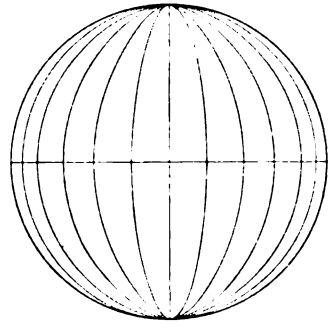
§ 47. Die Bestimmung der Länge war namentlich im Altertum eine schwierige Sache. Orte, die genau nördlich oder südlich voneinander liegen, haben offenbar gleichzeitig Mittag. Eine Linie von Pol zu Pol, die durch solche Orte geht, heißt Mittagslinie oder **Meridian**. Dagegen hat man in verschiedenen Meridianen zu verschiedener Zeit Mittag, und der Zeitunterschied hängt von der Entfernung der Meridiane ab. Da die Erde in 24 Stunden eine volle Umdrehung macht, dreht sie sich in einer Stunde um 15°, in vier Minuten

Digitized by Google

um 1°. Für jeden Grad, um den der Meridian eines Ortes weiter nach Westen liegt, ist also die Uhr um vier Minuten zurück.

Kennt man also den Zeitunterschied zweier Orte, so kann man berechnen, um wieviel Grad der eine westlicher als der andere liegt. Man kann daher mit einer genauen Uhr (Chronometer), die an einem Orte richtig geht, nach einem anderen Orte reisen und aus dem Zeitunterschied beider Orte ihren Längenunterschied berechnen. Im Altertum hatte man aber keine genau gehenden Uhren. Noch weniger hatte man den Telegraphen, mit dem man heutzutage in einem Nu nach einem Orte melden kann, wieviel Uhr es an einem anderen ist.

Fig. 28.



Die Erdkugel mit 24 Meridianen.

Hipparch hatte den sinnreichen Gedanken, während einer Mondfinsternis den Mond als eine Art Weltuhr zu benutzen. In Rom und in Alexandria beobachtet man zu gleicher Zeit das Eintreten der Verfinsterung. Wenn dann an beiden Orten durch astronomische Beobachtungen die Zeit ermittelt wird, so findet man, daß die Verfinsterung in Alexandria z. B. um 10 Uhr, in Rom dagegen um 8 Uhr 52 Minuten beobachtet wurde. Hieraus ergibt sich, daß Rom 17° westlich von Alexandria liegt.

In der neueren Zeit zählt man nach der Vorschrift Ludwigs XIII. vom Jahre 1634 die Meridiane von Ferro, der südlichsten der Kanarischen Inseln, aus. Auf den Seekarten bildet gewöhnlich die Sternwarte von Greenwich[1]) den Ausgangspunkt, und die Schiffschronometer gehen nach Greenwicher Zeit. Die Franzosen zählen die Meridiane von Paris[2]) aus.

Nach einem internationalen Abkommen rechnet man jetzt in den meisten Kulturstaaten nach der sogenannten Einheitszeit. Alle Orte, die zwischen zwei Meridianen liegen, die 15° voneinander entfernt sind, haben dieselbe Zeit, und zwar die des mittleren Meridians der betreffenden Zone. Die Zeitzone, in der Deutschland, Dänemark, Schweden, Österreich u. s. w. liegen, reicht von 7° 30′ bis 22° 30′. Die Zeit des mittleren, also des 15. Meridians (Stargard) differiert von der Greenwicher Zeit (7° 30′ östlich bis 7° 30′ westlich von Greenwich) um eine Stunde. In Deutschland wurde die Einheitszeit (mitteleuropäische Zeit) am 1. April 1893 eingeführt.

Eine Linie, die von der Beringstraße aus durch den Stillen Ozean geht, hat man als Datumgrenze gewählt. Westlich von dieser Linie ist das Datum um 1 höher als östlich von derselben.

---

[1]) 17° 39′ 46″ östlich von Ferro.
[2]) 20° 30′ östlich von Ferro.

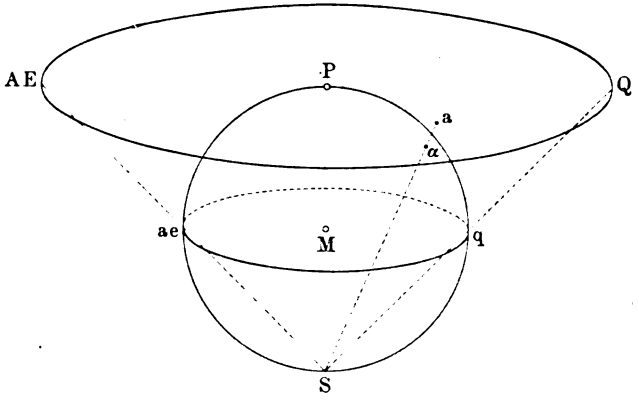
Digitized by Google

§ 48. Auch um die schwierige Aufgabe der Kartenzeichnung, wenn es sich um ein großes Stück der Erdoberfläche handelt, hat sich Hipparch verdient gemacht.

Ein kleineres Stück der Erdoberfläche kann als eben betrachtet und daher auf einer Ebene abgebildet werden. Ein größeres Stück der Erdoberfläche dagegen kann nicht ohne weiteres auf eine Ebene gezeichnet werden. Wenn auch ein Stück einer Kugelschale dünn und biegsam wäre wie Papier, so würde man ein solches Stück doch nicht plattdrücken können. Es würde in der Mitte Falten oder am Rande Risse bekommen.

Betrachtet man (Fig. 29) die nördliche Halbkugel des Himmels $aePq$ nicht vom Mittelpunkt M, sondern vom Südpol des Himmels S aus, und

Fig. 29.



Stereographische Projektion einer Kugelfläche.

denkt man sich eine Ebene, die die Himmelskugel im Nordpol P berührt, so trifft eine gerade Linie von S nach dem Stern α die Berührungsfläche im Punkt a, in welchem der Stern abgebildet werden muß. Wenn sich nämlich das Auge im Punkt S befindet, so bekommt es denselben Eindruck, einerlei ob der Stern im Punkt α oder im Punkt a steht.

Diese von Hipparch benutzte, aber wahrscheinlich von älteren Mathematikern erdachte Projektionsmethode ist die sogenannte stereographische. Sie hat natürlich ihre Mängel, wie überhaupt jede Methode, vermittelst deren man die an und für sich unmögliche Aufgabe lösen will, eine Kugeloberfläche auf eine Ebene zu zeichnen. So bekommt z. B. der Kreis AEQ einen doppelt so großen Durchmesser als aeq, während die Teile, welche in die Nähe von P fallen, nicht sonderlich vergrößert werden.

Diese Methode ist besonders geeignet, wenn ein großer Teil der Kugel abgebildet werden soll. Er kann sogar größer als die Halbkugel sein, allerdings wird dann die Vergrößerung am Rande noch stärker (vergl. die Karte zu § 2). Man benutzt diese Projektionsmethode außerdem zur Darstellung

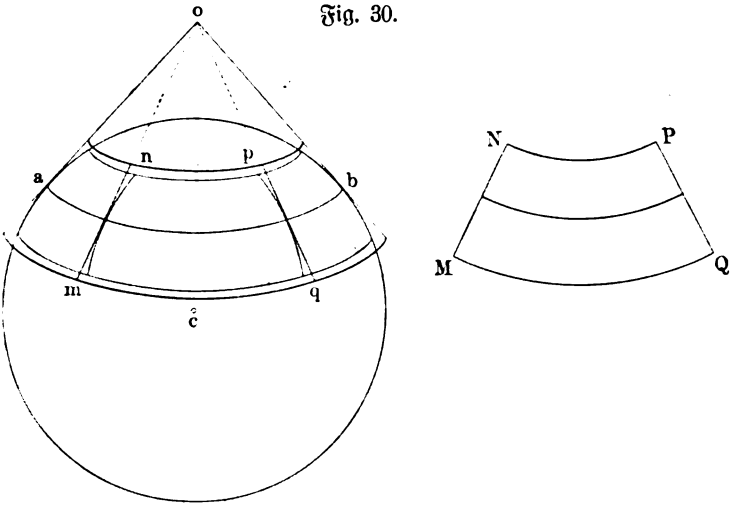
Digitized by Google

der östlichen und der westlichen (oder der nördlichen und der südlichen) Halbkugel der Erde.

§ 49. Eine andere Projektionsmethode, die sogenannte Kegelprojektion, wurde von Ptolemäus eingeführt. Sie eignet sich aber nur zur Darstellung eines kleinen Teiles der Erdoberfläche.

Es sei *ab* (Fig. 30) der Parallelkreis, der durch die Mitte der Gegend geht, die abgebildet werden soll. Man denkt sich nun einen Kegel, dessen

Fig. 30.



Kegelprojektion.

Spitze in der Erdachse liegt und der die Kugel den Kreis *ab* entlang berührt. Dann denkt man sich die Punkte der Kugelfläche auf geraden Linien, die vom Mittelpunkt *c* kommen, auf die Kegelfläche übertragen, so daß das Auge in *c* von der Kegelzone denselben Eindruck wie von der Kugelzone bekommt. Dann schneidet man den Kegel längs *mn* auf und breitet ihn in eine Ebene aus, was immer möglich ist. Man hat dann eine ebene Karte, auf der die Meridiane als gerade Linien abgebildet sind, die nach einem Punkt im Norden konvergieren, und die Parallelkreise als Kreisbogen um diesen Punkt als Mittelpunkt. Die Gegenden bei *ab* erhalten ihre natürliche Größe, die Gegenden nördlich und südlich von *ab* werden dagegen etwas vergrößert.

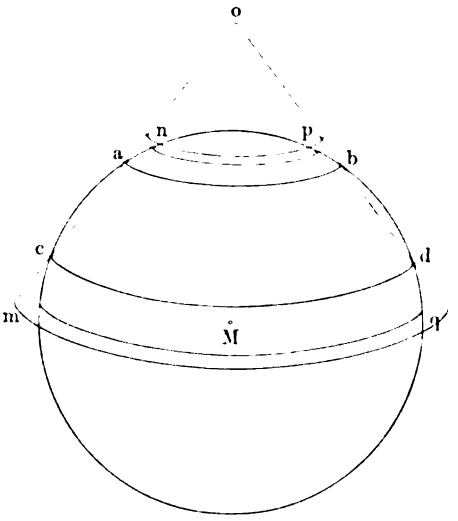
§ 50. Die zuletzt genannte Methode wurde bedeutend verbessert von Gerhard Kremer, genannt Mercator (geb. 1512 in Flandern, gest. 1594 in Duisburg). Auf dem Teil der Erdoberfläche, welcher abgebildet werden soll, werden zwei Parallelkreise, *ab* und *cd* (Fig. 31, a. f. S.), gewählt und durch diese wird ein Kegel gelegt. Derjenige Teil der Erdoberfläche, welcher zwischen die beiden Kreise fällt, liegt nun außerhalb, das übrige innerhalb des Kegels. Der erstere Teil wird daher bei der Übertragung auf die Kegelfläche verkleinert, der andere vergrößert, während die beiden Parallelkreise ihre wahre Größe behalten.

Digitized by Google

Nach dem Aufschneiden und Ausbreiten werden auch hier die Meridiane gerade Linien und die Breitenkreise Kreisbogen.

Im 18. Jahrhundert führte man die Abänderung ein, daß man auf den Parallelkreisen die wahren Längen abtrug, wodurch die untersten und die obersten Parallelkreise kürzer wurden, als bei dem ursprünglichen Verfahren. Die Meridiane bleiben dann keine geraden Linien, sondern werden gebogen, indem sie oben und unten näher zusammenkommen, als dann, wenn sie gerade Linien sind.

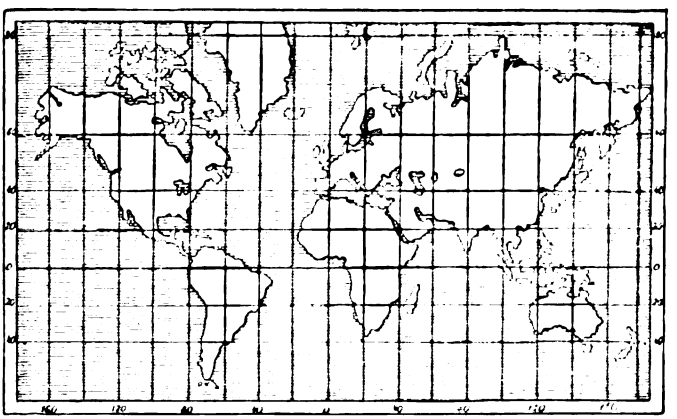
Fig. 31.



Verbesserte Kegelprojektion.

§ 51. Von den vielen Vorschlägen, die außerdem zur Anwendung gekommen sind, verdient besonders Mercators Projektion hervorgehoben zu werden, die man ebenfalls G. Kremer verdankt. Am Äquator ist offenbar ein Längengrad gerade so lang wie ein Breitengrad. Nach dem Pol zu hat der Breitengrad dieselbe Länge wie am Äquator, dagegen ist der Längengrad kürzer. Der Längenunterschied zwischen Christiania und St. Petersburg ist z. B. 20°, aber die Entfernung ist nur 150 Meilen, während 20° auf dem Äquator gleich 300 Meilen sind. Wenn man nun den Äquator als gerade

Fig. 32.



Die Erdoberfläche in Mercators Projektion.

Digitized by Google

Linie zeichnet und die Meridiane ebenfalls als gerade, auf dem Äquator senkrecht stehende Linien, so würde die Entfernung von Christiania nach St. Petersburg durch eine ebenso lange Linie vorgestellt werden wie dieselbe Anzahl von Längengraden auf dem Äquator. Die Entfernung würde also doppelt so groß sein, als sie sein müßte, und die Länder in diesen Gegenden würden also ganz verzerrt erscheinen, wenn man nicht die Breitengrade in demselben Verhältnis wie die Längengrade vergrößerte. Dies geschieht daher in Mercators Projektion, damit die richtigen Formen erhalten bleiben. Dagegen werden natürlich die einzelnen Teile der Erdoberfläche um so größer gezeichnet, je weiter man sich vom Äquator entfernt. Da die Formen an jeder einzelnen Stelle richtig bleiben, und namentlich da die Linien (Küsten, Himmelsrichtungen) überall die richtige Richtung haben, ist diese Projektionsmethode namentlich für Seekarten sehr geeignet, da es für diese von großer Wichtigkeit ist, daß jeder Gegenstand, z. B. ein Leuchtfeuer, in der Richtung gesehen wird, wo es sich wirklich befindet. Ebenso ist sie sehr geeignet für die Darstellung der gesamten Erdoberfläche (mit Ausschluß der Polargegenden). Zur Vergleichung der Größe verschiedener Gebiete (Grönland und Afrika) ist eine solche Karte natürlich ganz ungeeignet.

§ 52. Nach Hipparch ging es mit der Astronomie abwärts, wenn auch noch einzelne bedeutende Gelehrte auftraten.

Ebenfalls auf Rhodus wirkte im ersten Jahrhundert v. Chr. der Astronom Posidonius, geb. in Apomea in Syrien, vielleicht 103 v. Chr. Er soll eine Zeitlang in Rom gelebt haben und mit Pompejus befreundet gewesen sein, dessen Besuch er in seinen alten Tagen auf Rhodus empfing, ebenso mit Cicero, dessen Schilderung astronomischer Dinge sich wahrscheinlich auf das stützt, was er von Posidonius gelernt hatte.

Posidonius hat mehrere seine Messungen ausgeführt und muß gute Instrumente gehabt haben (möglicherweise diejenigen Hipparchs). Seine Bestimmung des Erdumfanges durch Messung der Höhe eines Sternes im Meridian, einmal auf Rhodus und einmal in Alexandria, ist so gut, daß nichts daran auszusetzen ist (180 000 Stadien). Für die Entfernung des Mondes fand er sehr richtig 2 000 000 Stadien (§ 32) und für die Entfernung der Sonne 12 bis 13 Millionen Meilen. Der wirkliche Abstand ist ungefähr 20 Millionen Meilen. Im Vergleich mit älteren Messungen ist dies Resultat aber ausgezeichnet. Leider wissen wir nicht, auf welche Weise Posidonius zu diesem Resultat gekommen ist. Es ist also nicht ausgeschlossen, daß die Genauigkeit des Wertes auf Zufälligkeit beruht oder daß die Zahl durch einen Fehler beim Abschreiben entstellt worden ist.

Sicher ist, daß Posidonius die Kleinheit der Erde im Vergleich zur Sonne erkannte. Er meinte, von der Sonne aus gesehen müsse sie als ein Punkt erscheinen, und von den Fixsternen aus würde sie gar nicht sichtbar sein, auch wenn sie selbstleuchtend wäre.

Es macht einen wunderlichen Eindruck, neben diesen richtigen Erkenntnissen bei Posidonius der Auffassung zu begegnen, daß die Erde wohl eine

Digitized by Google

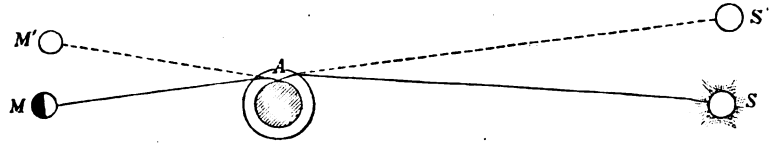
Kugel ist, sich aber nicht bewegt. Sie ruht in der Mitte, und alles andere bewegt sich. Dies bezeichnet einen Rückschritt. Aber wir treffen auch einige neue Beobachtungen, so z. B. daß Ebbe und Flut durch den Mond verursacht werden, da sie zur Zeit des Vollmondes und des Neumondes am stärksten sind. Da die letztere Beobachtung an den Küsten des Mittelmeeres nicht gemacht werden kann, muß die Erscheinung Posidonius von einem anderen Orte her bekannt gewesen sein.

Ebenso bemerkte Posidonius, daß die Sonne und der Mond größer erscheinen, wenn sie am Horizont stehen, während doch eine Winkelmessung zeigt, daß ihre Größe unverändert ist. Dies gilt übrigens auch für die Sternbilder, z. B. den großen Bären, der sehr klein erscheint, wenn er hoch am Himmel steht. Der Grund liegt darin, daß uns das Himmelsgewölbe nicht als eine Halbkugel erscheint, sondern so geformt, daß der vertikal über uns liegende Teil näher ist als die am Horizont gelegenen Teile. Von zwei Gegenständen, die wir unter demselben Winkel erblicken, von denen uns aber der eine weiter entfernt zu sein scheint als der andere, erscheint uns der entferntere als der größere.

§ 53. Im ersten Jahrhundert n. Chr. lebte Kleomedes, der uns das meiste, was wir von Posidonius wissen, überliefert hat. Auch er selbst hat eine bemerkenswerte Erscheinung aufzuklären versucht.

Kleomedes schreibt, er habe es anfangs nicht glauben wollen, daß man abends vor Sonnenuntergang den verfinsterten Vollmond am Himmel gesehen habe. Kleomedes wußte nämlich, daß eine Mondfinsternis (Fig. 33) eintritt, wenn Sonne, Erde und Mond in gerader Linie stehen. Wenn da-

Fig. 33.



Mondfinsternis dicht am Horizont.

gegen Sonne und Mond beide am Himmel stehen, so geht die Verbindungslinie beider über uns hinweg, und die Erde kann sich also nicht mitten zwischen ihnen befinden.

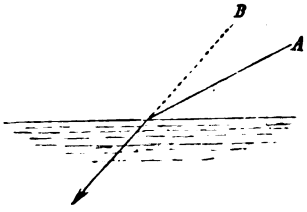
Nachdem Kleomedes jedoch die Überzeugung gewonnen hatte, daß die Erscheinung tatsächlich beobachtet worden war, suchte er eine Erklärung für dieselbe. „Sollte über der Erde eine hohe Wolke geschwebt haben, die ihren Schatten auf den Mond warf?“ Dies wahr unwahrscheinlich, da nach Posidonius die Luft nur neun Meilen hoch war. Oder „sollte es nicht die wahre Sonne, sondern eine Nebensonne gewesen sein?“ Oder endlich „gehen vielleicht in den tieferen Luftschichten die Lichtstrahlen nicht in gerader Linie?“

Vielleicht ist Kleomedes durch diesen Umstand veranlaßt worden, sich besonders mit dem Licht zu beschäftigen, über das er Verschiedenes schreibt.

Digitized by Google

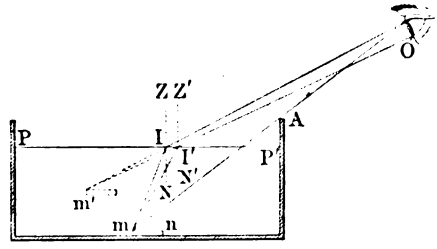
So sagt er, daß ein Lichtstrahl, der schief in einen dichteren Stoff, z. B. Wasser, eindringt, in diesem mehr nach innen geht, während er bei dem umgekehrten Übergang mehr nach außen geht. Ein von *A* (Fig. 34) kommender Strahl geht im Wasser nach *C*, und denselben Weg nimmt ein Strahl, der von *C* nach *A* geht. Daher kann man sich, fährt Kleomedes fort, so stellen, daß das Auge (Fig. 35) eine Münze in einem Becher nicht sehen

Fig. 34.



Brechung eines Lichtstrahles in Wasser.

Fig. 35.



Brechung des Lichtes beim Übergang aus Wasser in Luft.

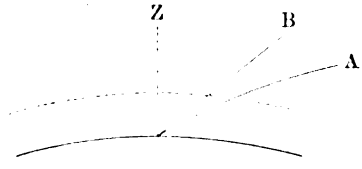
kann, weil sie durch den Rand des Bechers verdeckt ist, während sie zum Vorschein kommt, wenn man Wasser in den Becher gießt. Dann geht nämlich das Licht auf dem in der Figur angedeuteten Wege. Das Auge hat nur Empfindung für die Richtung, aus der es das Licht aufnimmt, und erblickt die Münze im Punkt *m*.

In derselben Weise, fügt er hinzu, kann man infolge der Strahlenbrechung die Sonne sehen, die bereits unter dem Horizont steht (Fig. 33).

§ 54. Gründlich durchgeführt wurden diese Betrachtungen jedoch erst durch Claudius Ptolemäus, geb. 70 oder 77 in Ptolemais in Ägypten und gest. 147 in Alexandria, wo er als Schriftsteller und Beobachter tätig war.

Ptolemäus hat ganz besonders die Gesetze für den Verlauf der Lichtstrahlen studiert. Hier soll nur hervorgehoben werden, daß er erkannte, daß die Luft, die er sich bis an den Mond reichend vorstellte, auf die Lichtstrahlen eine ähnliche Wirkung ausüben müsse wie das Wasser. Ebenso wie ein vertikaler Stab im Wasser keine „Brechung" erleidet, muß auch ein im Zenit stehender Stern da erscheinen, wo er sich wirklich befindet. Alle anderen Sterne dagegen müssen scheinbar höher stehen, als sie in Wirklichkeit stehen. Denn wenn der Gang des Lichtstrahles durch die von *A* ausgehende Linie (Fig. 36) angegeben wird, so muß das Auge den Eindruck bekommen, als ob der Stern in der Richtung nach *B* stände. Diese Ablenkung muß um so stärker werden, je näher der Stern am Horizont steht, und Ptolemäus ermittelte die Größe der Ablenkung durch Messung der Poldistanz der Circum-

Fig. 36.



Atmosphärische Strahlenbrechung.

Digitized by Google

polarsterne, wenn sie tief und wenn sie hoch am Himmel im Meridian standen. Im ersteren Falle war er in Bezug auf den Pol stärker verschoben als im letzteren.

Ptolemäus entwarf auch Tabellen, vermittelst derer er später seine Sternbeobachtungen berichtigen konnte. Für einen Stern:

90°	über	dem	Horizont	ist	die	Ablenkung	0
60°	"	"	"	"	"	"	$1/2'$
30°	"	"	"	"	"	"	$1\,2/3'$
0°	"	"	"	"	"	"	$35'$.

Wie man sieht, ist die Ablenkung nur in der Nähe des Horizontes so groß, daß sie bei den Beobachtungen im Altertum berücksichtigt werden mußte. Ebenso sieht man, daß die Sonne, die ungefähr einen Durchmesser von 30′ hat, vollständig untergegangen und doch noch über dem Horizont sichtbar sein kann. Da der untere Sonnenrand etwas mehr gehoben wird als der obere, erscheint die Sonne beim Aufgang und Untergang etwas abgeplattet.

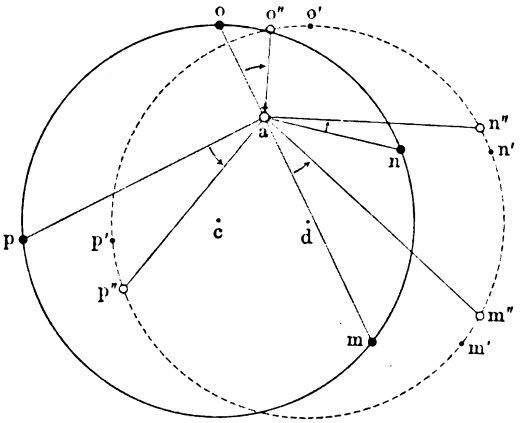
§ 55. Ptolemäus war nicht nur ein sorgfältiger und einsichtsvoller Beobachter und ein tüchtiger Mathematiker, sondern auch Schriftsteller. Sein Hauptwerk, welches später den arabischen Namen Almagest bekam, ist seinerzeit ein ausgezeichnetes Lehrbuch der Astronomie gewesen. Zu bedauern ist es jedoch, daß durch dieses Werk ältere Originalarbeiten, z. B. diejenigen Hipparchs, verdrängt worden sind. Dies ist indessen nicht zu verwundern. Vor der Erfindung der Buchdruckerkunst konnte man nicht solche Auflagen von Büchern haben wie später, und man war daher bestrebt, eine Abschrift des neuesten und besten, welches existierte, zu bekommen. Da der Almagest vieles enthält, was frühere Astronomen gefunden hatten, z. B. den ausgezeichneten Sternkatalog Hipparchs, allerdings mit den Berichtigungen, die Ptolemäus wegen der Präzession seit der Zeit Hipparchs hinzufügen zu müssen glaubte, so ist man zuweilen, namentlich in früheren Zeiten, in den Irrtum verfallen, Ptolemäus für den Urheber des gesamten Inhaltes zu halten, während man ihn anderseits, namentlich in der neueren Zeit, für einen unredlichen Abschreiber erklärt hat. Das letztere ist ebenso unbillig, als das erstere unrichtig. Aber nach dem Gesagten ist es erklärlich, daß die Weltanschauung, der Ptolemäus persönlich huldigte, ziemlich uneingeschränkt über anderthalb Jahrtausende herrschte, während Aristarchs geniale Gedanken über die Achsendrehung der Erde und ihre Bewegung um die Sonne vollkommen in Vergessenheit gerieten.

Ptolemäus war nämlich ein äußerst nüchterner Gelehrter, der sich einfach an das hielt, was er sehen konnte. Er deutete nicht einmal die Möglichkeit an, daß es die Erde sein könne, die sich bewegt. Es sieht so aus, als ob sich der Fixsternhimmel dreht, und daher nimmt er an, daß er sich dreht. Die Sonne, der Mond und die Planeten habe abweichende Bewegungen, und er beschreibt, wie sie sich bewegen müssen, damit ihre Bewegung von der feststehenden Erde aus so gesehen werden muß, wie es tatsächlich der Fall ist.

Digitized by Google

§ 56. Bereits Hipparch hatte gefunden, daß die Entfernung des Mondes von der Erde zu verschiedenen Zeiten verschieden ist, und er hatte daher angenommen, daß sich der Mond in einem Kreis bewege, dessen Mittelpunkt nicht mit dem Mittelpunkt der Erde zusammenfällt. Ptolemäus fand, daß diese Annahme zur Erklärung der Unregelmäßigkeiten in der Mondbewegung nicht ausreicht. Er nimmt daher an, daß sich der Mittelpunkt der Mondbahn selbst wieder um den Mittelpunkt der Erde bewegt. Der Mond bewegt sich also auf einem Kreis, dessen Mittelpunkt selbst wieder einen Kreis beschreibt. In ähnlicher Weise erklärte Ptolemäus die Bewegung der Planeten, aber auch dies war nicht ganz neu. Lange vor der Zeit des Ptolemäus hatte nämlich ein berühmter Mathematiker, Eudoxus von Knidos (407 bis 354 v. Chr.), diese Erklärung für die vorschreitende (rechtläufige) und rückschreitende (rückläufige) Bewegung und das Stillstehen der Planeten aufgestellt. Es sei *a* (Fig. 37) die als ruhend gedachte Erde. Der Mittelpunkt des Kreises, der die Marsbahn vorstellen soll, bewege sich in einem Monat von *c* nach *d*. Der punktierte Kreis stelle die Marsbahn nach einem Monat vor. Befindet sich nun Mars im Punkt *m*, so befindet sich dieser Punkt nach einem Monat infolge der Bewegung des ganzen Kreises in *m'*. Im Laufe des Monats ist aber Mars von *m'* nach *m''* weitergegangen. Eine Sehlinie nach dem Mars ist also in diesem Monat von *am* nach *am''* (in der Richtung des Pfeiles) vorgeschritten. Wenn Mars im Punkt *n* steht, so bewegt sich in derselben Weise die Sehlinie in einem Monat von *an* nach *an''*. Wenn sich dagegen Mars in *o* befindet, so bringt die Verschiebung des Kreises diesen Punkt nach *o'*, aber Mars ist inzwischen von *o'* nach *o''* gegangen. Die Sehlinie von der Erde nach dem Mars ist also aus der Lage *ao* nach *ao''* „zurückgegangen". Wenn Mars in seiner Bahn weiter fortgeschritten ist, bewegt er sich wieder rechtläufig von *ap* nach *ap''*. Wenn die Vorwärtsbewegung und die Rückwärtsbewegung des Mars erklärt ist, ergibt sich die Erklärung für das Stillstehen von selbst. Dies tritt für den Augenblick ein, wenn die eine Bewegung in die andere übergeht. Ptolemäus führte diese Erklärung durch und nahm für die Himmelskörper von der Erde aus die folgende Reihenfolge an: Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars,

Fig. 37.

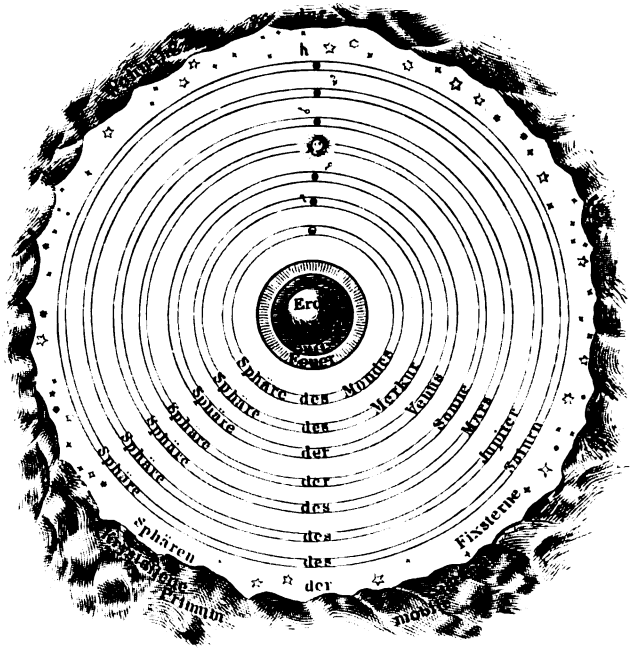


Erklärung der Planetenbewegung durch die Annahme der Epicykel.

Digitized by Google

Jupiter, Saturn, Fixsternhimmel. Nach einem älteren ägyptischen System wurde im Gegensatz zum Ptolemäischen ganz richtig angenommen, daß Venus der Erde näher kommt als Merkur. Ptolemäus sagt selbst von seiner Theorie, daß es schwieriger sei, die Bewegungen zu verstehen als sie zu berechnen. Aber die Theorie erhielt sich nichtsdestoweniger als die einzige Erklärung, als etwas, was zu bezweifeln ein Verbrechen war. Als man später nicht alle Bewegungen der Theorie anpassen konnte, erweiterte man

Fig. 38.



Das Ptolemäische Weltsystem.

diese, indem man nicht nur das Zentrum des Kreises, auf dem sich der Planet bewegt, sich auf einem Kreis bewegen ließ, sondern indem man auch das Zentrum dieses Kreises auf einem Kreis laufen ließ, dessen Zentrum sich ebenfalls wieder auf einem Kreis bewegte, u. s. w.

Die Araber.

§ 57. Nach Ptolemäus lebten in Alexandria und den anderen griechischen Städten keine Astronomen von größerer Bedeutung mehr, aber doch noch einzelne Naturforscher, die später zu erwähnen sind. Schließlich verlor die Wissenschaft den festen Boden unter den Füßen, den sie viele Jahre lang in Alexandria gehabt hatte, als die Mohammedaner, die in den ersten 150 Jahren

Digitized by Google

nach Mohammed meist als erobernde Völker auftraten, im 7. Jahrhundert in die Stadt einzogen und die letzten Reste zweier großer Bibliotheken zerstörten. Bekanntlich soll der Kalif Omar die Verbrennung der Bücher mit den Worten befohlen haben: „Entweder enthalten diese Bücher, was im Koran steht, und dann sind sie überflüssig, oder sie enthalten etwas anderes, und dann sind sie gottlos.“ Diese Erzählung hat jedoch in späteren Zeiten etwas an Glaubwürdigkeit eingebüßt, und es ist nicht unwahrscheinlich, daß manche Werke nach anderen Orten, namentlich nach Konstantinopel, der Hauptstadt des oströmischen Reiches, gebracht worden sind, wo griechische Kultur zwar nicht in hoher Blüte stand, aber doch bis zur Eroberung der Stadt durch die Türken, 1453, erhalten blieb.

Und doch sollten gerade die Mohammedaner, die im ersten Eroberungsrausch so viel von der griechischen Kultur zerstörten, das Bindeglied zwischen den Kulturen des Altertums und des Mittelalters werden. Ohne dies Bindeglied würde unsere Kenntnis des Kulturlebens der Völker des Altertums wahrscheinlich eine sehr geringe sein.

Das riesige mohammedanische Reich erstreckte sich von Spanien über Nordafrika und Asien bis nach Hindostan. Es wurde zwar später geteilt, aber die mächtigen Kalifen in Bagdad und Cordova blieben eine lange Reihe von Jahren die Beschützer der Wissenschaften. Sie beriefen Gelehrte an ihren Hof, einerlei ob es Mohammedaner, Christen oder Juden waren, sie gründeten an verschiedenen Orten ihrer Reiche Hochschulen und legten Bibliotheken an, in denen Abschriften und Übersetzungen griechischer Werke gesammelt wurden. Unter anderen war Abdallah al Mamun, der im Jahre 813 Kalif von Bagdad wurde, nachdem er von einem griechischen christlichen Arzt erzogen worden war, ein so großer Freund der Wissenschaften, daß er vom byzantinischen Kaiser Michael II., den er besiegt hatte, beim Friedensschluß verlangte, er solle ihm Abschriften aller griechischen Werke liefern.

In Spanien blühte im 10. Jahrhundert Cordova, die Residenz der Kalifen. Die Stadt hatte eine Hochschule, die von der Jugend des christlichen Europas besucht wurde, und eine Bibliothek von 600 000 Bänden, die leider auf Befehl des Kardinals Ximenes verbrannt wurde, als Ferdinand der Heilige die Stadt im Jahre 1236 erobert hatte. Cordova war einige Jahrhunderte lang Europas Mittelpunkt für Wissenschaft, Kunst (Baukunst) und Poesie. Das maurische Spanien hatte im 12. Jahrhundert 14 Hochschulen und 70 öffentliche Bibliotheken. Auch Landwirtschaft, Gartenbau, Bergbau und Handel standen in jener Zeit bei den Mauren in hoher Blüte.

Es fehlte auch nicht an originellen Schriftstellern unter den Mohammedanern, allein hervorragende Geister, die einen Wendepunkt in der Geschichte der Wissenschaften bezeichnen, traten nicht auf. Es war in erster Linie das Interesse der Kalifen für die Wissenschaften und ihr tolerantes Verhalten gegen Andersgläubige, was die wissenschaftlichen Bestrebungen an einzelnen Knotenpunkten zusammenhielt. Allein obschon mehrere Kalifen sich bemühten, die Früchte der Wissenschaft durch Schulen (in Cordova waren im 10. Jahr-

Digitized by Google

hundert 80 Freischulen) und Bibliotheken unter dem Volke zu verbreiten, so gelang dies doch im Vergleich zu der aufgewendeten Mühe nur in geringem Grade.

Das Volk war nun einmal nach dieser Richtung hin nicht beanlagt, und wo das Volk nicht gewissermaßen den breiten Boden bildet, aus dem an jeder beliebigen Stelle etwas Hervorragendes emporschießen kann, da konnten Veranstaltungen wie die der Kalifen für die Überlieferung des Vorhandenen und für einen gewissen äußeren Glanz wohl ihre Bedeutung haben, aber in höherem Grade fruchtbar wurden sie nicht. Wegen des historischen Zusammenhanges muß daher der mohammedanischen Periode gedacht werden, und es kann hingefügt werden, daß die Araber geschickte Astronomen besaßen, deren Tätigkeit auf Ermittelung der Größe der Erde [1]), der Stellung der Himmelskörper, der Länge des Jahres, der Schiefe der Ekliptik u. a. gerichtet war. Da diese Messungen jedoch kaum besser ausgeführt wurden, als die älteren Messungen von den Griechen, so brauchen wir uns bei diesen Bestrebungen nicht aufzuhalten.

Die Vermittelung der Araber zwischen dem Altertum und dem Mittelalter sowie zwischen Ostasien und Europa hat deutliche Spuren in einer Reihe von Namen hinterlassen, die wir heute noch gebrauchen, z. B. Zenit, Nadir, Aldebaran (Stern im Stier), Alkor und Mizar (im großen Bär), Alhidade (Vorrichtung zum Ablesen der Winkel an Meßinstrumenten). Als Vermittler zwischen dem Osten und dem Westen haben sie von den Chinesen den Kompaß und den Salpeter, von den Indern deren Zahlensystem und Buchstabenrechnung gebracht, jenes unter dem Namen „arabische Zahlen", diese unter dem Namen Algebra.

Das Erwachen der Astronomie in Westeuropa.

§ 58. Bei den europäischen Völkern zeigte sich während der arabischen Periode nur geringes Interesse für die Wissenschaften. Karl der Große machte den Versuch, an seinem Hofe ähnliche Einrichtungen ins Leben zu rufen wie die Kalifen an dem ihrigen. Er berief den gelehrten Alkuin (geb. 736 in Northumberland) an seinen Hof und veranlaßte die Errichtung

[1]) Der oben erwähnte Al Mamun ließ z. B. eine Gradmessung in Mesopotamien vornehmen. Von zwei Expeditionen maß die eine einen Grad im Norden, die andere einen Grad im Süden. Jene fand für die Länge des Grades 56, diese 56⅔ arabische Meilen. Al Mamun, der hiermit unzufrieden war, ließ die Messung wiederholen, allein das Resultat war dasselbe. Welche Messung die beste war, können wir nicht entscheiden, da wir nur wissen, daß eine arabische Meile gleich 4000 Ellen war, aber nicht, ob dies königliche Ellen oder schwarze Ellen waren. Die erstere hatte 24, die letztere 27 Zoll. Der Zoll hatte die Länge von sechs mit der Seite aneinandergelegten Gerstenkörnern. Da nach dieser Messung der nördliche Grad kürzer war als der südliche, so wurde das Ergebnis dieser Messung im 17. Jahrhundert — leider zur Irreleitung — bei der Frage nach der wahren Gestalt der Erde geltend gemacht.

Digitized by Google

von Klosterschulen. Doch war der unmittelbare Erfolg seiner Bestrebungen kein sehr bedeutender.

Ferner werden als Freunde der Wissenschaften der hohenstaufische Kaiser Friedrich II. (gest. 1250) und König Alfons X. von Kastilien (gest. 1284) genannt. Der letztere ließ durch eine Kommission, der außer christlichen auch jüdische und mohammedanische Gelehrte angehörten, verbesserte astronomische Tafeln berechnen, da die Tafeln des Ptolemäus nicht befriedigten. Da auch die Arbeit der Kommission nicht befriedigte, ließ der König die Berechnung nochmals ausführen, ohne jedoch ein besseres Resultat zu erzielen. Wie sehr König Alfons die Unvollkommenheit der Wissenschaften erkannt hatte, geht aus einer Äußerung hervor, die er einst seinen Astronomen gegenüber getan hat. Als diese ihm die Bewegung der Himmelskörper nach der verbesserten Ptolemäischen Theorie erklärt hatten, meinte er, wenn ihn Gott bei Erschaffung der Welt zu Rate gezogen hätte, so würde alles einfacher eingerichtet worden sein. Dies Wort fiel übrigens auf gefährlichen Boden und hat ihm später den Vorwurf der Gotteslästerung zugezogen.

Es ist auffallend, daß jeder der drei genannten Fürsten zu den Mohammedanern in einem freundschaftlichen oder wenigstens friedlichen Verhältnis stand.

§ 59. Die Jugend Europas konnte sich nicht in die geistige Öde, die in ihren Heimatländern herrschte, finden. Viele zogen daher nach Spanien, um bei den Mauren zu studieren. Dies wurde aber von seiten der Kirche nicht gern gesehen, und da einer der alten Schriftsteller, die man vorzugsweise in Spanien studierte, Aristoteles war, so wurden dessen Schriften bis in das 12. Jahrhundert hinein verketzert und verbrannt, und seine Anhänger wurden aus der Kirche ausgestoßen.

Endlich entschloß man sich zu dem einzigen Mittel, welches den Strom ablenken konnte, indem man um das Jahr 1200 anfing, in verschiedenen Städten Europas, Paris, Oxford, Cambridge, Neapel, Salerno, Bologna, Padua, Pavia u. s. w., Hochschulen, „Universitäten", zu gründen. Man mußte nun aber natürlich einen Gegenstand des Studiums haben, und da gab es keinen anderen Ausweg, als dieselben Dinge aufzunehmen, die man verdammt hatte, solange sie nur bei den Mauren zu haben waren. Man verglich nun die Naturanschauung des Aristoteles mit der Bibel und fand, daß diese überall, wenigstens mit Hilfe einiger Interpretation, miteinander in Einklang zu bringen sind. Die Schriften des Aristoteles wurden nun nicht nur geduldet, sondern sie wurden zu einer Richtschnur für Fragen der Naturforschung erhoben. Was Aristoteles sagte, war richtig, nicht mehr und nicht weniger. Die Folge davon war, daß Aristoteles, der in vielen physikalischen Fragen ziemlich verkehrte Ansichten hat, ein Hindernis für weiteren Fortschritt bildete. Im Laufe der folgenden Jahrhunderte hatte mancher Gelehrte unter diesem Geisteszwang zu leiden und gegen denselben zu kämpfen, bis es endlich gelang, das Joch abzuschütteln.

§ 60. Es zeigte sich glücklicherweise, daß der europäische Boden für das

Digitized by Google

Gedeihen der Wissenschaften ebenso günstig war wie der mohammedanische. Es dauerte allerdings einige Jahrhunderte, bis sich die Wissenschaften etwas eingebürgert hatten, und noch mehrere Jahrhunderte lang blieben selbst die Männer, die sich ernstlich mit den Wissenschaften beschäftigten, in astrologischen und mystischen Vorstellungen befangen. Es waren merkwürdigerweise die Mohammedaner selbst, die, allerdings ganz unfreiwillig, den Anstoß dazu geben sollten, daß die Entwickelung der Wissenschaften in Europa in Fluß kam. Als die Türken 1453 Konstantinopel eroberten, wurde eine Menge griechischer Lehrer heimatlos. Sie wandten sich größtenteils nach Italien und hier fanden sie die Vorbedingungen, die es ihnen ermöglichten, die Arbeit da aufzunehmen, wo sie ihre Vorfahren seinerzeit aufgegeben hatten. Daher wurde namentlich Italien der Ausgangspunkt der Renaissance.

§ 61. Recht bezeichnend ist es daher auch, daß der größte Astronom und Mathematiker des 15. Jahrhunderts, Regiomontanus, bei griechischen Flüchtlingen in Italien in die Lehre gehen mußte.

Regiomontanus, dessen Name eigentlich Johannes Müller war, wurde 1436 in Königsberg in Franken geboren. Er war außergewöhnlich

Fig. 39.

Regiomontanus.

früh entwickelt, studierte in einem Alter von 12 bis 15 Jahren in Leipzig und dann in Wien, wo er Schüler des ausgezeichneten Astronomen Purbach war, der sich wieder der Lehre von der Drehung der Erde zuwandte, da ihn das Ptolemäische System nicht befriedigte. Er wurde vom päpstlichen

Digitized by Google

Legaten in Wien eingeladen, mit ihm nach Rom zu reisen, um daselbst das griechische Original des Almagest zu studieren. Ehe jedoch der Plan zur Ausführung kam, starb Purbach 1461. Die Einladung erging nun an Regiomontan, und dieser leistete derselben auch Folge. Er lernte bei einem griechischen Flüchtling, Georg von Trapezunt, die griechische Sprache und studierte dann den Ptolemäus und andere griechische Schriftsteller in der Ursprache.

Nach seiner Rückkehr war er kurze Zeit Professor der Astronomie in Wien, folgte dann einer Einladung des Königs Mathias Corvinus von Ungarn, um die griechischen Manuskripte, die dieser aus Konstantinopel mitgebracht hatte, zu ordnen, und siedelte 1471 nach Nürnberg über, wo er in dem Patrizier Bernhard Walther einen Gönner und wahren Freund der Wissenschaften fand. Dieser baute das erste astronomische Observatorium in Deutschland. Während Hipparch zur Bestimmung des Ortes der Sonne den Mond benutzte, scheint Walther der erste gewesen zu sein, der zu demselben Zwecke die Venus benutzte (s. § 39). Auch diese ist nämlich zuweilen für ein gutes Auge vor Sonnenuntergang sichtbar, und da sie sich weniger bewegt als der Mond, eignet sie sich für diese Bestimmung sehr gut. Regiomontanus stand bei seinen Zeitgenossen in großem und wohlverdientem Ansehen. Er war ebenso wie Purbach für die Einführung unseres jetzigen Zahlensystems tätig, welches viel übersichtlicher und für die Rechnung bequemer ist als das römische Zahlensystem. Er führte die Buchstabenrechnung ein und verbesserte die Trigonometrie. Als Astronom vertrat er den nüchternen Standpunkt, daß es wichtiger sei, gute Beobachtungen zu schaffen, als Weltsysteme zu entwerfen. Deshalb ließ er auch die Idee Purbachs von der Drehung der Erde fallen. Er meinte, wenn die Erde durch die Luft flöge, so könnten die Vögel ihr Nest nicht wieder erreichen. Man dachte sich nämlich damals die ganze Welt mit Luft erfüllt und dachte nicht daran, daß die Erde selbst ihre Luft mit sich führt und daher nicht durch sie hindurchfliegt. Man sprach allerdings von der Höhe des Dunstkreises (z. B. Posidonius; § 53), allein hiermit meinte man die tiefere Schicht, in der sich die Wolken befinden, nicht die höhere reine Luft zwischen den Himmelskörpern.

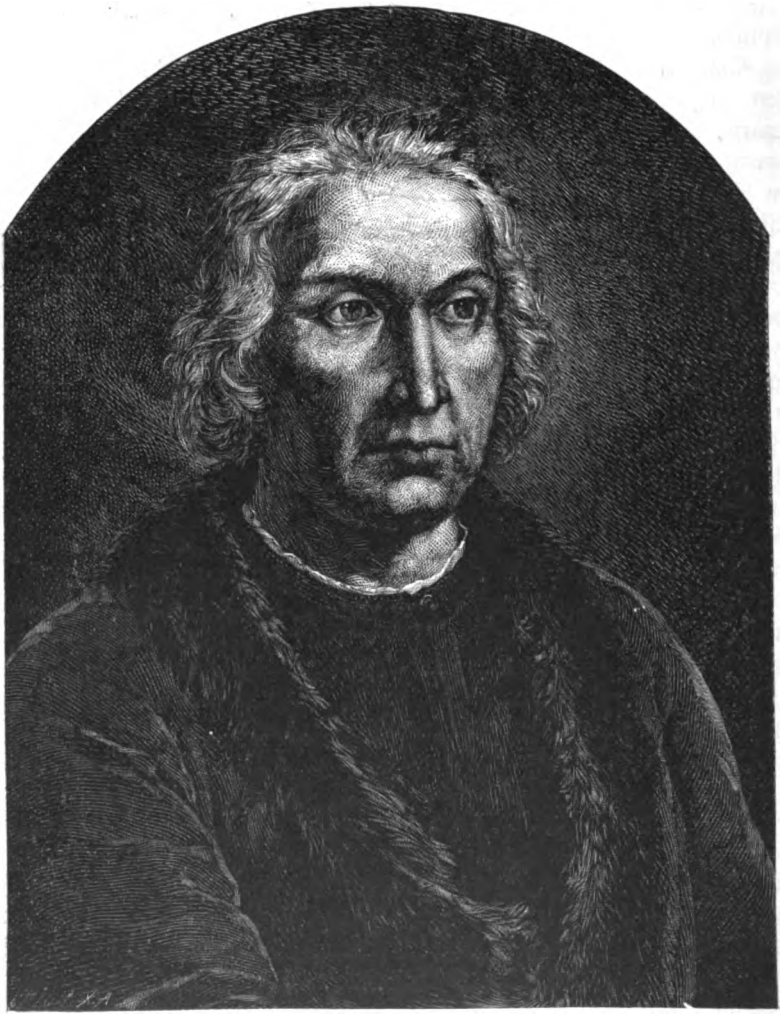
Es war damals allgemein bekannt, daß die Zeitrechnung in Unordnung gekommen war, und Papst Sixtus IV. lud daher den berühmten Regiomontanus ein, nach Rom zu kommen und den Plan für eine Kalenderverbesserung zu entwerfen. Zur Belohnung sollte er nachher Bischof in Regensburg werden. Er starb jedoch kurz nach seiner Ankunft in Italien im Jahre 1446.

Eine Arbeit des Regiomontanus von ganz außergewöhnlicher Bedeutung war eine Art Kalender für die 32 Jahre 1475 bis 1506, welcher Angaben über die Sonne, den Mond und die Sterne enthielt. Dieses Werk bildete einen wichtigen Beitrag zu der Kunst, „nach den Sternen zu segeln", die damals aufkam, und das Buch wurde ein unschätzbares Hilfsmittel für Columbus und die anderen großen Seefahrer der damaligen Zeit.

Digitized by Google

Während die Taten dieser Seefahrer selbst als eine Frucht der erwachenden Astronomie zu betrachten sind, wirkten sie anderseits befruchtend auf die Entwickelung der Wissenschaft und der Kultur überhaupt. Es kann sich

Fig. 40.



Christoph Columbus.

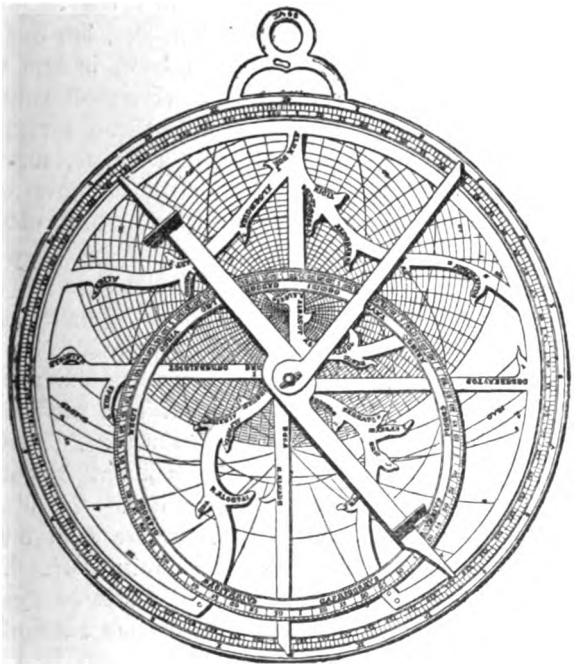
hier nicht um die Einzelheiten der Tat des Columbus handeln, sondern nur um den Zusammenhang derselben mit der Entwickelung der Astronomie.

§ 62. Christoph Columbus, geb. 1456 (nicht, wie früher angenommen wurde, 1436), hielt sich eine Zeitlang auf der Universität in Pavia

Digitized by Google

auf, wo er sich vorzugsweise mit Mathematik, Geographie, Astronomie und Navigation beschäftigte. Nachdem er einige Jahre Seemann gewesen war und das Mittelmeer befahren, auch Fahrten nach England, Island und nach einigen anderen Gegenden unternommen hatte, ließ er sich in Lissabon nieder, wo er sich verheiratete und sich mit Zeichnen von Land- und Seekarten ernährte. Hier studierte er weiter astronomische Geographie, namentlich unter dem Einfluß von Martin Behaim, einem Schüler Regiomontans, der 1480 nach Portugal kam. Hier wurde er zum Mitglied der Kommission zur Förderung der Navigation ernannt, was eine sehr bedeutungsvolle Stellung war, da in dieser Zeit die Auffindung des Seeweges nach Indien eine Frage war, die die Portugiesen sehr beschäftigte. Von Behaim lernte Columbus

Fig. 41.



Ein Astrolabium von Regiomontanus.

auch das von Regiomontanus erfundene Astrolabium kennen, welches zur Messung der Sonnenhöhe diente und an einem Schiffsmast aufgehängt wurde.

Columbus studierte auch die alten griechischen Werke, die von der Gestalt der Erde handeln, und er stand in Briefwechsel mit mehreren Gelehrten, die sowohl mit der alten als auch mit der neuen Literatur bekannt waren, wie z. B. mit dem betagten italienischen Astronomen Toscanelli (geb. 1397), der Colombus in seinen Plänen eifrig bestärkte. In einem seiner Briefe

Digitized by Google

an Columbus sagt er unter anderem: „Du wirst gesehen haben, daß die Reise, welche Du unternehmen willst, viel weniger gefährlich ist, als man glauben sollte, und Du würdest vollkommen davon überzeugt sein, wenn Du wie ich Gelegenheit gehabt hättest, mit vielen Personen zu verkehren, die in diesen Ländern gewesen sind."

Die Größe der Erdkugel kannte man ja ziemlich gut, und man konnte daher berechnen, wie weit es über den Atlantischen Ozean nach Asien sein konnte, wenn man nur wußte, wie weit es durch den bekannten Teil der Welt nach dem östlichen Asien war. Unzuverlässigen Beschreibungen von Reisenden, die in jenen Teilen Asiens gewesen waren (Marco Polo), hatten Toscanelli und andere zu der irrigen Meinung verleitet, daß sich der bekannte Teil der Welt über zwei Drittel des Erdumfanges erstrecke, daß also der Weg über den Atlantischen Ozean ein Drittel des Umfanges betrage. Das letztere stimmte allerdings ungefähr für den Weg, den Columbus nach Westen hin zurücklegte, und er lebte und starb daher in dem Glauben, daß es Asien und seine zahlreichen Inseln seien, die er entdeckt habe.

Columbus wurde also sozusagen vom Strome der Zeit getrieben. Daß Amerika früher oder später entdeckt werden mußte, unterliegt keinem Zweifel. Aber daß Columbus 1492 der glückliche Entdecker wurde, der der Menschheit den großen Dienst leistete, daß die Entdeckung nicht weiter hinausgeschoben wurde, das verdankt man hauptsächlich der festen Überzeugung und dem eisernen Willen, mit dem er sich bekanntlich durch die mannigfachen Schwierigkeiten, die sich ihm entgegenstellten, hindurchkämpfte.

So gab die in Europa erwachende griechische Astronomie die Veranlassung zu den praktischen Resultaten, die Columbus und die anderen großen Entdeckungsreisenden jener Zeit erzielten, und sie lieferte selbst Hilfsmittel für das Werk in Gestalt von astronomischen Instrumenten, Tabellen und Anweisungen. Anderseits übten auch die geographischen Entdeckungen ihren Einfluß auf die Entwickelung der Astronomie aus. Es ist etwas ganz anderes, von jemand zu hören, der auf die andere Seite der Erde segelt, als beweisen zu hören, daß die Erde eine Kugel sein muß. Aber schon die Vorstellung, daß die Erde eine im Raum frei schwebende Kugel und nicht eine Scheibe ist, ist für die ganze Weltanschauung von außerordentlicher Bedeutung. Es ist daher auch sehr bezeichnend, daß alsbald nach diesen großen Entdeckungen auf dem Gebiete der Astronomie das Kopernikanische Weltsystem erschien.

§ 63. Nikolaus Kopernikus war 1473 in Thorn, also in Polen, geboren, war aber deutscher Abkunft. Sein Vater stammte aus Frankenstein in Schlesien.

Kopernikus studierte zuerst in Krakau Theologie und Medizin, auch Mathematik und Astronomie. Im Jahre 1496 begab er sich nach Italien, wo er sich in Bologna, Rom und Padua juristischen, medizinischen und astronomischen Studien widmete. Ohne Zweifel hat er auch während dieser Zeit die alten Griechen studiert. Dagegen scheinen einige Beobachtungen, die er

Digitized by Google

ausführte, von untergeordneter Bedeutung gewesen zu sein, wie überhaupt das Beobachten seine starke Seite nicht gewesen zu sein scheint (§ 70). Nach seiner Rückkehr aus Italien (1505) ließ er sich in Heilsberg nieder, wo sein Oheim Bischof und er selbst seit einigen Jahren Kanonikus war. Hier wid=

Fig. 42.

Nikolaus Kopernikus.

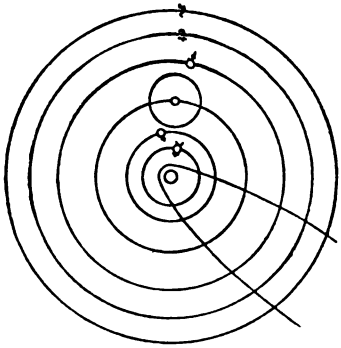
mete er sich in Ruhe und Zurückgezogenheit während eines sechsjährigen Auf=enthaltes der Bearbeitung seines berühmten Werkes über die Bewegung der Himmelskörper. Nach dem Tode seines Oheims lebte er bis zu seinem Tode (1543) mit kurzer Unterbrechung in Frauenburg.

Digitized by Google

Sein Werk hatte er 1530 vollendet. Er machte seinen wissenschaftlichen Freunden Mitteilungen über dasselbe, dachte aber nicht daran, es zu veröffentlichen. Erst im Jahre 1542 ließ er sich durch das Drängen seiner Freunde, namentlich des Bischofs Giese von Kulm und des Professors Rhäticus in Wittenberg, dazu bestimmen, das Werk drucken zu lassen, welches, wie er in der Widmung an den Papst Paul III. sagt, nicht neun Jahre, sondern viermal neun Jahre bei ihm geruht hatte. Kopernikus hat die Vollendung des Druckes nicht erlebt. In der ersten Zeit wurde auch nur ein kleiner Kreis von Gelehrten mit dem Werke bekannt, und die nächsten 70 Jahre gingen ruhig hin, ohne daß von seiten der Kirche irgend welcher Anstoß an dem Werk genommen wurde.

§ 64. Das Werk[1]) des Kopernikus umfaßt sechs Bücher und bildet eine ausführliche Astronomie, die sogar Einzelheiten, wie Hilfstabellen für astronomische Berechnungen, enthält. Aber bei allen Betrachtungen und Erklärungen hält er an der Voraussetzung fest, daß die Sonne stillsteht und daß sich die Erde im Laufe eines Jahres um die Sonne und im Laufe eines Tages um ihre Achse dreht, die gegen die Erdbahn geneigt ist, so daß sie immer sich selbst parallel bleibt und nur im Laufe der Jahrtausende ihre Richtung verändert. Dies alles ist nicht neu (vergl. § 29 und 30). Kopernikus kann es bei dem Studium der alten Griechen gefunden haben, aber es der Vergessenheit entrissen zu haben, ist nicht minder verdienstvoll, und es ist ein schönes Zeugnis dafür, daß Kopernikus seinen eigenen Arbeiten das historische Studium zu Grunde gelegt hatte, daß er es als ein Ergebnis dieses Studiums ausspricht, daß sich auch die Planeten wie die Erde in einem Kreise um die Sonne bewegen.

Fig. 43.



Das Kopernikanische System (mit einer Kometenbahn).

Kopernikus ist der erste, der die Erde und die Planeten zu Geschwistern, zu Kindern der Sonne macht, und der ihnen nach der Entfernung von der Sonne die folgende Reihenfolge anweist: Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn. Je weiter einer von diesen Planeten von der Sonne entfernt ist, desto langsamer bewegt er sich.

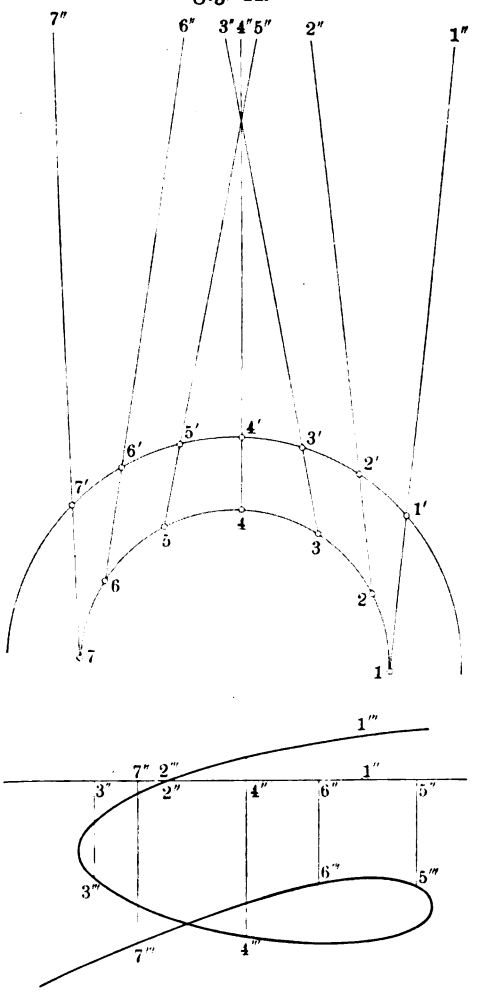
Hiermit erklärt sich die schleifenförmige Bewegung der Planeten sehr einfach. In Fig. 44 stellen die beiden Kreise die Erdbahn und die Marsbahn vor. Erde und Mars sind gleichzeitig an den mit 1 und 1′ bezeichneten Stellen ihrer Bahnen, ebenso gleichzeitig (z. B. einen Monat später) in

[1]) Der Titel lautet: De revolutionibus orbium coelestium libri VI. Der erste Druck erschien in Nürnberg.

Digitized by Google

2 und 2′, später in 3 und 3′ u. s. w. Man sieht also Mars erst in der Richtung 1″ unter den Sternen, dann in der Richtung 2″, dann in der Richtung 3″, also fortschreitend, dann in den Richtungen 4″ und 5″, also zurückgehend, endlich in den Richtungen 6″ und 7″, also wieder fortschreitend. Wenn nun die Erdbahn und die Marsbahn genau in derselben Ebene lägen, würde man den Planeten in einer und derselben Linie hin und her gehen sehen (Fig. 44, 1″, 2″, 3″, 4″, 5″, 6″, 7″). Denkt man sich aber die Erdbahn in der Ebene der Zeichnung liegend, so liegt die Marsbahn zum Teil über und zum Teil unter der Ebene der Zeichnung. Läge z. B. 1′ über, 2′ in und 3′ bis 7′ unter der Ebene der Zeichnung, dann würde der erste Teil der Bahn (1‴ bis 2‴) über der geraden Linie liegen, der Rest dagegen unter derselben. Mars kommt nun in seiner Bewegung von 2′ bis 7′ zwar immer tiefer unter die Ebene der Zeichnung, aber er steht doch in den Punkten 4′ und 5′ scheinbar tiefer als im Punkt 6′, denn die Erde ist in den Punkten 4 und 5 dem Mars näher, und infolgedessen geht die Sehlinie steiler abwärts. So entsteht die Schleife 1‴ 2‴ 3‴ 4‴ 5‴ 6‴ 7‴.

Fig. 44.



Bewegung des Mars.

Es ist also die Neigung der Planetenbahnen gegen die Erdbahn und die veränderliche Entfernung der Planeten von der Erde, die die scheinbare unregelmäßige Seitenbewegung der Planeten bewirken.

In derselben Weise erklären sich die Bewegungen von Jupiter und Saturn.

Die Bewegungen von Merkur und Venus erscheinen von der Erde aus gesehen als hin und her gehende Bewegungen. In Wirklichkeit sind uns

Digitized by Google

diese beiden Planeten viel näher, wenn sie diesseit der Sonne stehen, als wenn sie jenseit derselben stehen. Wenn die Venus östlich von der Sonne steht, so daß die Sonne vor der Venus untergeht, so ist Venus nach Sonnenuntergang als Abendstern sichtbar. Steht sie dagegen westlich von der Sonne, so geht sie vor der Sonne auf und ist dann Morgenstern. Merkur ist ebenfalls zuweilen Abendstern und zuweilen Morgenstern, da er sich aber nicht weit von der Sonne entfernt, ist es sehr schwer, ihn in der Morgen- oder der Abenddämmerung zu beobachten, namentlich in unseren Breiten, wo die Sonne nicht steil untergeht. Kopernikus, der doch in Italien war, wo die Sonne schon etwas steiler untergeht und die Luft klarer ist als in Deutschland, soll es auf seinem Sterbebett beklagt haben, daß er niemals den Merkur gesehen habe.

Auch die Bahnen der inneren Planeten, namentlich die des Merkur, sind gegen die Erdbahn etwas geneigt, so daß man sie nur selten vor der Sonne vorübergehen sieht.

§ 65. So hatte Kopernikus unter der Voraussetzung, daß sich die Erde und die Planeten um die Sonne in Kreisen bewegen, für die eigentümlichen Bewegungen der Planeten eine Erklärung gefunden. Wenn aber die Erklärung mit den Beobachtungen in Einklang stehen sollte, so mußte er die Mittelpunkte der Kreise von der Sonne etwas entfernen, und doch war, wie er selbst einräumen mußte, eine vollkommene Übereinstimmung nicht zu erreichen. Nun kann man aber von einer Erklärung billigerweise verlangen, daß sie eine solche Übereinstimmung zuwege bringt. Und selbst wenn sie dies tut, so ist es doch nicht sicher, daß die Erklärung richtig ist. Tut sie es aber nicht, so kann sie nicht als richtig anerkannt werden. Der nächste große Astronom, Tycho Brahe, findet die nötige Übereinstimmung nicht. Er baut daher nicht ohne weiteres auf dieser Grundlage weiter, sondern nimmt das Problem von neuem in Angriff, und zwar gründlicher, als es je zuvor geschehen war.

§ 66. Tycho Brahe, geboren 1546 zu Knudstrup in Schonen, war unter zehn Geschwistern der älteste Sohn von Otto Brahe und Beate Bille. Seine Eltern waren beide von altem Adel. Er wurde bei seinem Oheim Jörgen Brahe in Taastrup, der in kinderloser Ehe lebte, erzogen. Nachdem er schon einige Jahre Lateinisch gelernt und sich sogar in der Abfassung lateinischer Verse und Briefe versucht hatte, kam er in seinem 13. Jahre auf die Universität in Kopenhagen. Eine Sonnenfinsternis, die im folgenden Jahre eintrat, erregte das Erstaunen Tychos namentlich deshalb, weil sie vorausgesagt worden war, und hiermit war sein Interesse für die Astronomie erweckt. Nach der Absicht seines Oheims sollte er jedoch Staatsmann werden. In seinem 15. Jahre wurde Tycho in Begleitung seines neunzehnjährigen Hofmeisters Vedel nach Leipzig geschickt, wo er Staatswissenschaften studieren sollte, und Vedel hatte strengen Befehl, ihn ausschließlich zu diesem Studium anzuhalten. Vedel tat sein Bestes, aber es gelang ihm nicht, Tycho vom Studium der Astronomie abzuhalten. Denn wenn

Digitized by Google

er nachts ſchlief, ſtand dieſer heimlich auf und beſchäftigte ſich mit den aſtronomiſchen Büchern und dürftigen Inſtrumenten, die er ſich heimlich angeſchafft

Fig. 45.

Tycho Brahe.

hatte. Sein Intereſſe für die Aſtronomie wurde noch geſteigert, als er im Jahre 1563 gelegentlich eines Zuſammentreffens (Konjunktion) von Jupiter

Digitized by Google

und Sonne mit seinen einfachen Mitteln nachweisen konnte, daß sowohl die Alfonsinischen Tafeln, als auch die auf Grund des Kopernikanischen Systems berechneten sogenannten Prutenischen Tafeln fehlerhaft waren.

Infolge des zwischen Dänemark und Schweden ausgebrochenen Krieges wurde Tycho 1565 von seinem Oheim zur Rückkehr in die Heimat veranlaßt. Kurz darauf starb dieser, und da Tycho bei seinen Standesgenossen nur wenig Verständnis und Sympathie fand, reiste er nach Wittenberg. Hier traf er zahlreiche Landsleute, auf die die Stadt Luthers eine starke Anziehungskraft ausübte. Eine Pest veranlaßte ihn, nach Rostock überzusiedeln. Hier trat er mit einem Professor Battus in Verkehr, der ein eifriger Astrolog war. Auch Tycho versuchte sich in dieser Kunst, die damals diejenige Anwendung der Sternkunde war, für die man am meisten Sinn hatte und für deren Ausübung die Fürsten besondere Astronomen anstellten. Tycho selbst hat sich jedoch später aus diesem Aberglauben mehr und mehr herausgearbeitet. So stellte er allerdings später auf Befehl Friedrichs II. die Nativität für die Prinzen Christian, Ulrich und Hans. Er führte zwar die dazu erforderlichen Berechnungen mit der größten Sorgfalt aus, unterließ es aber nicht, seine Zweifel an der Zuverlässigkeit der Astrologie zum Ausdruck zu bringen. So sagt er am Schlusse der Nativität Christians IV.: „Der Mensch ist von Gott mit einem freien Willen begabt worden, der über den Einflüssen der Himmelskörper steht." Am Schlusse der Nativität des Prinzen Ulrich sagt er, das Ganze sei nur eine Mutmaßung, auf die man sich durchaus nicht verlassen könne. Ähnlich äußert er sich in der Nativität des Prinzen Hans. Endlich schreibt er später mit Rücksicht auf Wettervoraussagungen deutscher Astrologen, die ihm zur Begutachtung vorgelegt wurden, die astrologischen Prophezeiungen seien wie ein Kothurn, der jedem beliebigen Beine angepaßt werden könne, und er habe nie ein sonderliches Zutrauen zu ihnen gehabt.

In Rostock hatte er das Unglück, mit einem Landsmann in Streit zu geraten und in einem Zweikampf auf der Straße einen Teil seiner Nase einzubüßen, was ihm später manche Unannehmlichkeiten zuzog.

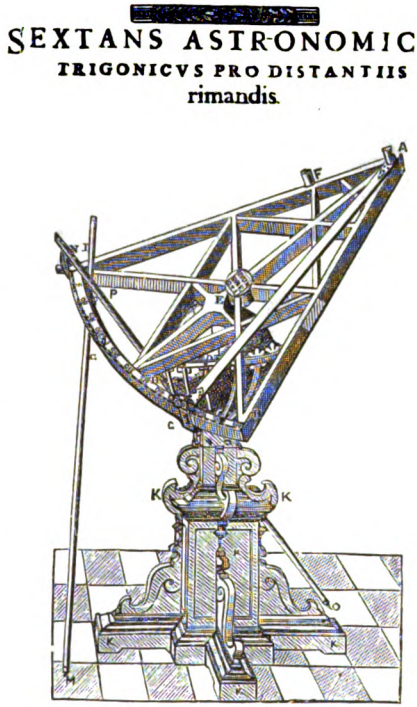
Auf seinen weiteren Reisen im Auslande traf er in Augsburg reiche Gönner der Astronomie und tüchtige Mechaniker, die er mit der Anfertigung neuer Instrumente beauftragte. So ließ er einen großen Quadranten aus Eichenholz mit Messingskala (Fig. 7) anfertigen, den 20 Mann Mühe hatten, an die Stelle im Garten zu schaffen, wo er aufgestellt werden sollte. Da man mit diesem Instrument nur die Höhe der Sterne über dem Horizont messen konnte, ließ er außerdem noch einen Sextanten (Fig. 46) anfertigen, mit dem der gegenseitige Abstand der Sterne gemessen werden konnte. Ferner ließ er einen vergoldeten Globus von 4 Fuß Durchmesser anfertigen, auf den die Sterne eingetragen werden sollten, nachdem er deren Ort bestimmt hatte, eine Arbeit, die er bis zu seinem Tode fortsetzte.

Im Jahre 1570 starb Otto Brahe, und Tycho erbte zusammen mit seinem ältesten Bruder Knudstrup. Er kehrte in die Heimat zurück, zog es

Digitized by Google

jedoch vor, bei seinem Oheim Steen Bille im Kloster Herredsvad zu wohnen, wo für ihn ein Laboratorium eingerichtet wurde. Er hatte sich nämlich im Auslande auch mit Chemie beschäftigt, deren Hauptproblem damals die Goldmacherei war. Diese „Kunst" stand unter dem Einfluß eines ähnlichen Aberglaubens wie die Astrologie, und man glaubte, es müsse ein innerer Zusammenhang zwischen beiden bestehen.

Fig. 46.



Tycho Brahes großer Sextant.

§ 67. Durch eine astronomische Erscheinung wurde Tycho plötzlich aus seinen chemischen Studien herausgerissen. Als er nämlich am Abend des 11. November 1572 aus seinem Laboratorium in den Hof kam, sah er hoch am Himmel im Sternbild der Kassiopeja einen glänzenden neuen Stern stehen. Nachdem er sich durch Befragen einiger Arbeiter und Bauern vergewissert hatte, daß die Erscheinung keine Ausgeburt seiner Phantasie war, machte er sich sofort daran, die Farbe und die scheinbare Größe des Sternes zu beobachten, sowie seinen Abstand von anderen Sternen zu messen. Der Stern überstrahlte alle anderen Sterne und war selbst um die Mittagszeit sichtbar. Anfangs war er weißlich, später wurde er gelb und rötlich und zugleich schwächer, bis er nach ungefähr anderthalb Jahren wieder vollständig unsichtbar war.

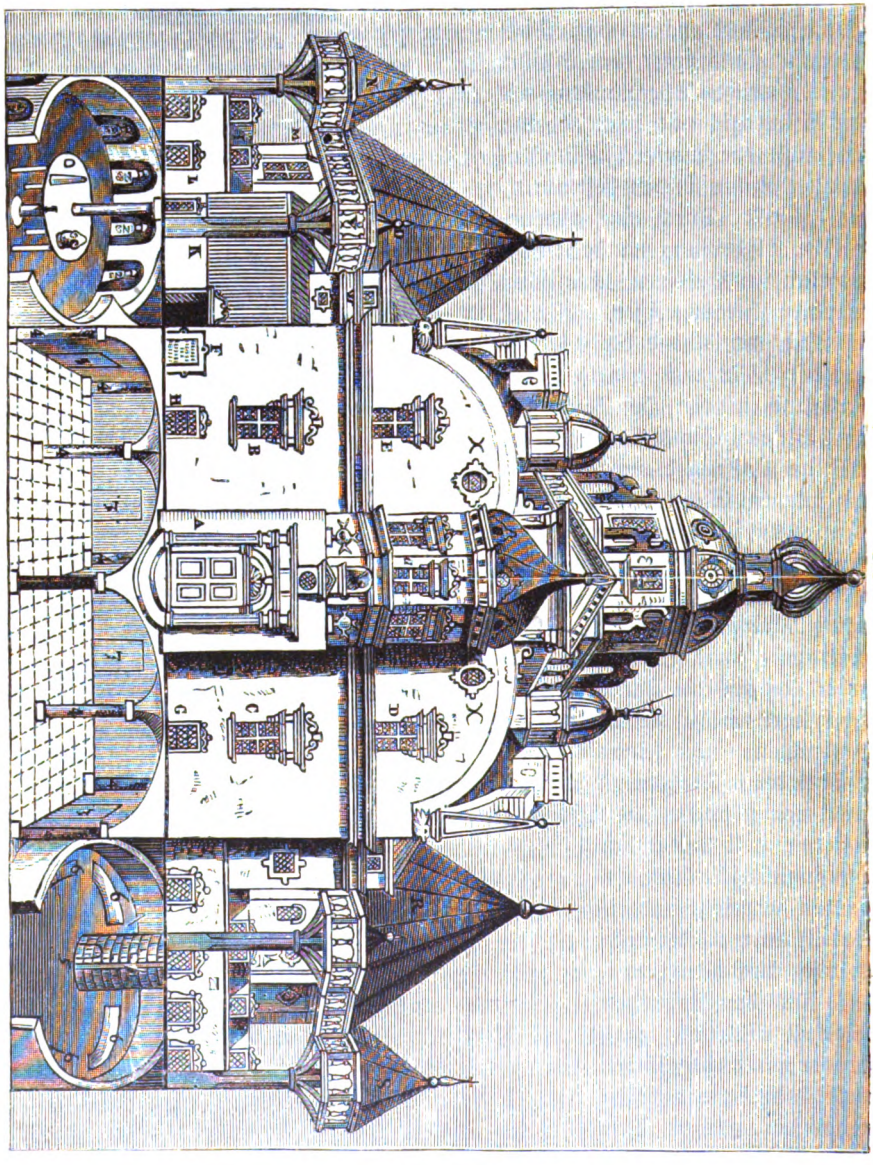
Fig. 47.

Kassiopeja mit Tycho Brahes neuem Stern.

Aus den Messungen Tycho Brahes ging hervor, daß der Stern vollständig fix war. Während der ganzen Zeit seiner Sichtbarkeit zeigte er keine Verschiebung. Von verschiedenen Seiten kamen mehr oder weniger

Digitized by Google

phantaſtiſche Schriften über den Stern. Auch Tycho Brahe ließ, noch ehe der Stern erloſchen war, eine Schrift über denſelben drucken. Später ſchrieb er ein ausführliches Werk über denſelben. Von dem Inhalte anderer Schriften



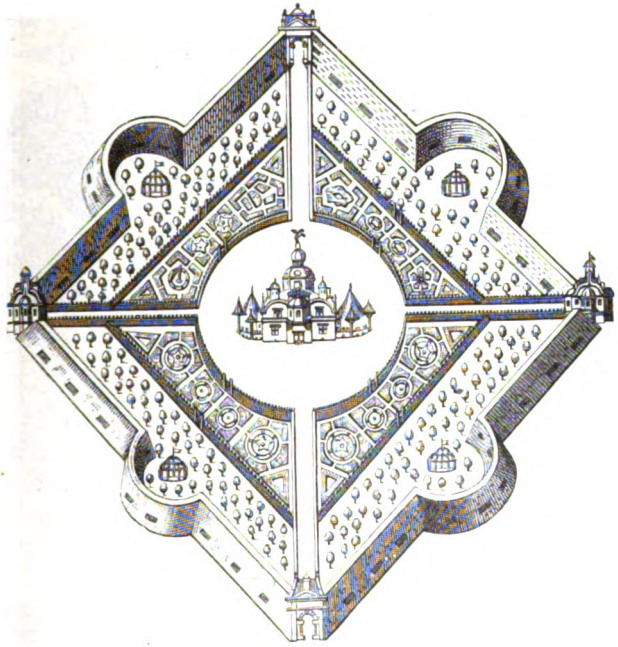
Die Uranienburg. Fig. 48.

iſt kaum etwas anderes hervorzuheben, als daß nach handſchriftlichen Chroniken in den Jahren 945 und 1264 ungefähr an derſelben Stelle ein neuer Stern geſehen worden ſein ſoll.

Digitized by Google

§ 68. Um das Jahr 1573 heiratete Tycho Brahe ein nichtadeliges Mädchen namens Chriſtine. Ob ſie eine Bauerstochter oder eine Pfarrerstochter war, iſt nicht bekannt, aber jedenfalls trug dieſer Schritt dazu bei, ſein Mißverhältnis zum Adel zu verſtärken. Tycho Brahe kaufte zwar 1574 ein Haus in Kopenhagen und hielt auf Wunſch des Königs im folgenden Winter Vorleſungen an der Univerſität, begab ſich aber 1576 nach Deutſchland, teils um alte Freunde zu beſuchen, teils aber auch, um ſich einen Aufenthaltsort zu ſuchen. Er hatte die Abſicht, ſich in Baſel niederzulaſſen; als er aber im folgenden Jahre wieder nach Haus kam, beſchloß der König auf den Vorſchlag ſeiner Ratgeber, Tycho Brahe dadurch an die Heimat zu feſſeln, daß er ihm einen Jahresgehalt (500 Thaler) und die Inſel Hveen

Fig. 49.



Die Uranienburg mit Umgebungen.

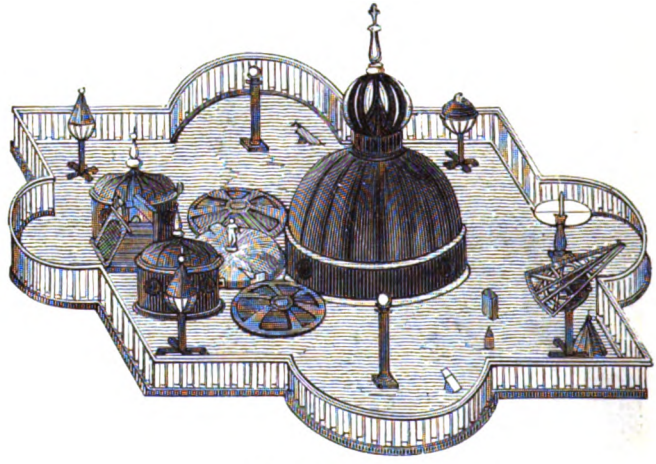
als Lehen auf Lebenszeit verlieh. Außerdem bewilligte ihm der König 400 Thaler zur Erbauung eines Hauſes und verlieh ihm ſpäter noch weitere Lehen. Dieſe königliche Freigebigkeit ſetzte ihn in den Stand, auf der Inſel Hveen die Uranienburg zu bauen, ein eigentümliches Gebäude, welches viele Sehenswürdigkeiten und Kunſtgegenſtände enthielt und von Obſtgärten und Wällen umgeben war. Die Burg war künſtleriſch ausgeſtattet und mit Porträts großer Männer der Vergangenheit ſowie mit Sinnſprüchen reich verziert. Von den letzteren ſcheint das in verſchiedener Form wiederkehrende „non

Digitized by Google

haberi, sed esse“ (nicht ſcheinen, ſondern ſein) der Lieblingsſpruch Tycho Brahes geweſen zu ſein. Zur Ausſtattung des Obſervatoriums gehörten ferner eine große Bibliothek, Sterngloben und Inſtrumente. Die letzteren waren zum größten Teil in dem unterirdiſchen Obſervatorium „Sternburg“ (Fig. 50) untergebracht, welches 1584 dicht neben der Uranienburg errichtet wurde.

Tycho Brahe empfing in der Uranienburg den Beſuch von Fürſten, Gelehrten und Staatsmännern aus fremden Ländern, und zu ſeinen Schülern

Fig. 50.



Die Sternburg.

gehörten nicht nur Perſonen, die ſpäter in hohe Stellungen kamen (Biſchöfe, Profeſſoren u. ſ. w.), ſondern ebenſo auch einfache Bauern, deren Namen man noch jetzt kennt. Die Uranienburg war eine Reihe von Jahren ein geiſtiger Mittelpunkt, von dem manche Anregung, auch in anderer als nur aſtronomiſcher Richtung, ausgegangen iſt.

§ 69. Als Aſtronom leiſtete Tycho Brahe Hervorragendes durch ſeine ungemein genauen Meſſungen, an die ſelbſt die Meſſungen Hipparchs nicht heranreichen. Seine Geſchicklichkeit in der Konſtruktion von Inſtrumenten und in der Art ihrer Benutzung, ſeine unermüdliche Sorgfalt, mit der er die Meſſungen ausführte und wiederholte, ſtehen unerreicht da, und ſeine Beobachtungen bilden für die nächſten 200 Jahre das Beſte, was man hatte, trotzdem wenige Jahre nach ſeinem Tode das Fernrohr in Gebrauch kam. Ja noch heute ſind die Meſſungen von Intereſſe, da ſie ein 300 Jahre altes und ſehr zuverläſſiges Material bilden. Als ein wichtiges Beiſpiel von Tycho Brahes vortrefflichen Beobachtungsmethoden kann hervorgehoben werden, daß er den Ort eines Sternes durch Beobachtung ſeines Durchganges durch den Meridian beſtimmte, indem nicht nur die Höhe im Meridian gemeſſen,

Digitized by Google

ſondern auch der Zeitpunkt des Durchganges beſtimmt wurde. Das erſtere gibt nämlich die Deklination (Abſtand vom Äquator) des Sternes, das letztere den öſtlichen oder weſtlichen Abſtand desſelben von einem beſtimmten Ausgangspunkt. Wie die Beobachtung ausgeführt wurde, wird durch Fig. 52 (a. f. S.)

Fig. 51.

König Jakob von Schottland beſucht Tycho Brahe.

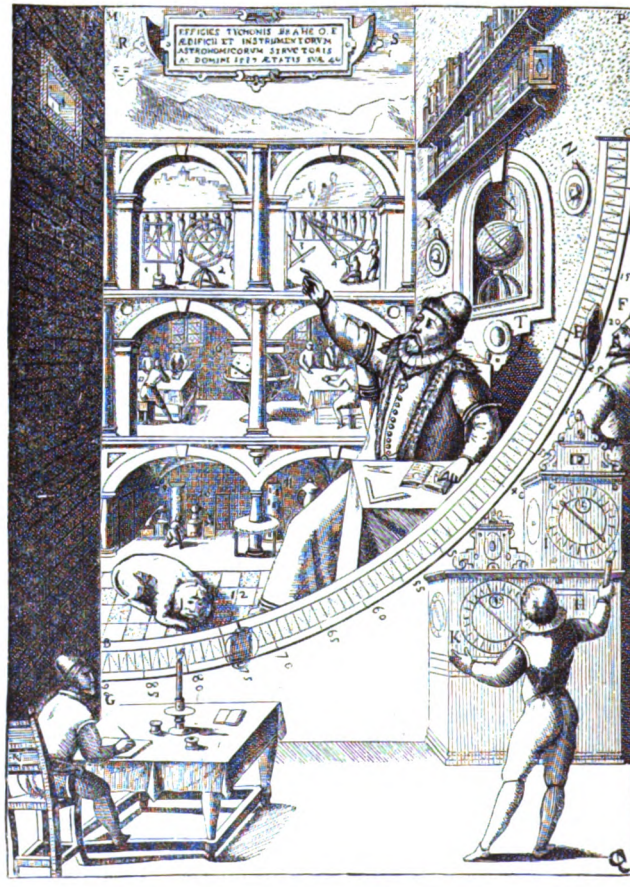
veranſchaulicht. Die Perſon *F* beobachtet die Höhe des Sternes und ruft den Augenblick des Durchganges aus, die Perſon *H* lieſt in dieſem Augenblick die Uhr ab, und die Perſon *G* notiert die Reſultate.

Auf Tycho Brahes genaue Meſſungen der Planeten begründete Kepler (§ 72) ſein Weltſyſtem. In einem Punkte hat Tycho Brahe nicht nur die Meſſung ausgeführt, ſondern auch die Beſchreibung geliefert. Aus den

Digitized by Google

Meſſungen der Kometen ging hervor, daß dieſe ſo weit entfernt ſind, daß ſie nicht, wie Ariſtoteles geglaubt hatte, Ausdünſtungen der Erdatmoſphäre ſein können, ſondern daß es Himmelskörper ſein müſſen, die ſich in ovalen Bahnen bewegen. Hiermit war die alte Theorie der Kreisbewegung mit den

Fig. 52.



Beobachtung der Meridianhöhe eines Sternes.

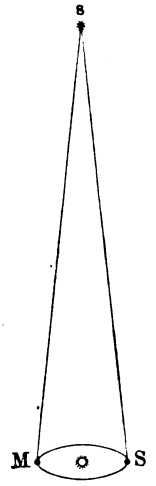
Kriſtallſphären in Stücke geſchlagen und ein wichtiger Fingerzeig in der Richtung der Keplerſchen Geſetze gegeben.

§ 70. Tycho Brahe erkannte die Keplerſchen Geſetze nicht als der Wahrheit entſprechend an. Wenn ſich die Erde wirklich um die Sonne bewegte, ſo mußte ſie ſich nach ſeiner Anſicht in einem halben Jahre ſo weit (um den Durchmeſſer der Erdbahn) entfernen, daß ſich eine Verſchiebung der Sterne, die ſenkrecht über der Erdbahn ſtehen, bemerkbar machen mußte. Steht die Erde im März in *M* (Fig. 53) und im September in *S*, ſo muß

Digitized by Google

der Stern s in verschiedener Richtung gesehen werden. Es muß ein Winkel MsS, eine Parallaxe, vorhanden sein. Es gelang indessen Tycho Brahe nicht, eine solche zu finden. Die Annahme, daß s so weit entfernt war, daß sich dieser Winkel selbst den feinen Messungen Tycho Brahes entzog, war auch unwahrscheinlich. Es würde nämlich dann die Parallaxe des Sternes im Vergleich mit seiner scheinbaren Größe, wie sie sich dem unbewaffneten Auge darstellt, verschwindend klein sein, so daß der Stern selbst einen Durchmesser haben würde, der größer ist als der Durchmesser der Erdbahn. Man hat Tycho Brahe herabsetzen und behaupten wollen, er sei kein großer Geist gewesen, da er Kopernikus nicht habe folgen können. Dies ist sowohl unhistorisch, als ungerechtfertigt. Unter ein Bild des Kopernikus, welches er von diesem erhalten und in der Uranienburg aufgehängt hatte, schrieb er einen lateinischen Vers, in welchem er seine Bewunderung für den Mann aussprach, der es gewagt hatte, die bis dahin feststehende Erde in Bewegung zu setzen und frei im Weltraume schweben zu lassen. Allein er kritisierte auch, und zwar mit Recht, die dürftigen und zum Teil fehlerhaften Beobachtungen des Kopernikus. Sein Schüler E. O. Morsing bestimmte mit einem Sextanten die Polhöhe von Frauenburg und fand im Gegensatz zu der Angabe des Kopernikus den von Tycho Brahe vermuteten Wert. Daß Tycho Brahe daran festhielt, daß die Erde stillsteht, ist ein Zeugnis für seine Wahrheitsliebe, indem er sich auf das verließ, was er durch seine Sinne wahrnahm, und das Gegenteil war damals durch nichts bewiesen. Der Umstand, daß die Fixsterne keine Parallaxe zeigen, bildete auch in den folgenden Jahrhunderten noch einen Stein des Anstoßes, als man bereits andere zuverlässige Beweise für die Bewegungen der Erde kannte.

Fig. 53.



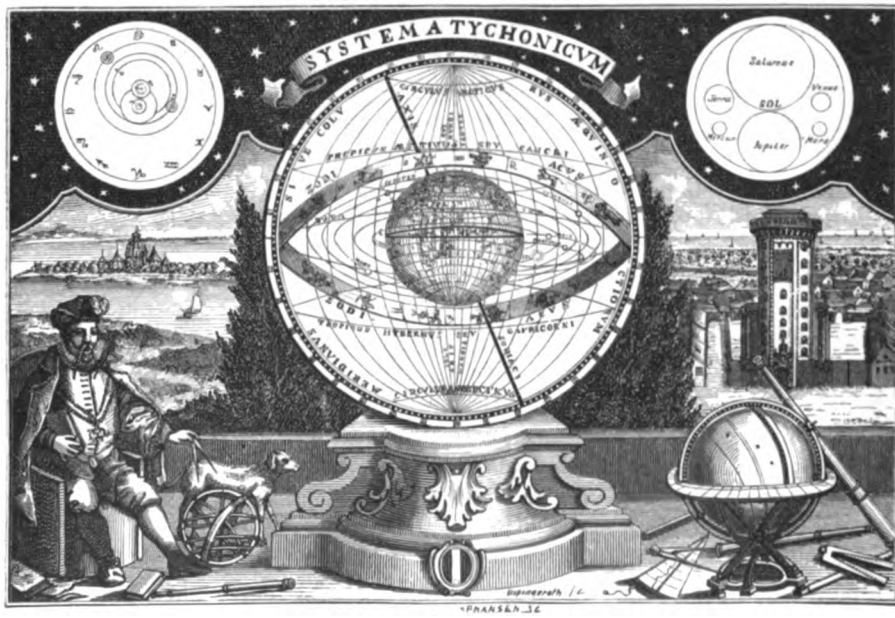
Sehlinien nach einem Stern an den Endpunkten eines Durchmessers der Erdbahn.

§ 71. Nach dem Tode Friedrichs II. kam für Tycho Brahe eine Zeit der Enttäuschungen und Verdrießlichkeiten, die er allerdings zum Teil selbst durch sein eigenwilliges Wesen verschuldet hatte. Was ihm am meisten Verdruß bereitete, war, daß die jüngeren Edelleute, die am königlichen Hofe an die Stelle der älteren getreten waren, ihm alle möglichen Hindernisse in den Weg legten. Er verlor ein Lehen nach dem anderen, und die veränderten Verhältnisse verleideten ihm den Aufenthalt auf Hveen dermaßen, daß er sich 1597 entschloß, Dänemark zu verlassen. Den folgenden Winter brachte er mit seiner Familie und denjenigen seiner Gehilfen, die ihm folgten, auf Einladung des Grafen Rantzau in Wandsbeck zu. Hier vollendete er sein wichtigstes Werk, ein Verzeichnis von mehr als 1000 Fixsternen. Von Kaiser Rudolf II. wurde er eingeladen, nach Prag zu kommen, und er machte den Versuch,

Digitized by Google

seine Arbeiten hier fortzusetzen. Als aber der Kaiser merkte, daß ihm der Aufenthalt in der Stadt nicht behagte, bot er ihm drei Landschlösser zur Auswahl an. Tycho wählte Benatek, und hier arbeitete er noch einige Jahre, aber augenscheinlich unter starker Sehnsucht nach seinem Vaterland und seinen alten Freunden, namentlich seinem Schüler Longomontanus. Tycho Brahe hatte gewissermaßen einen anderen Charakter angenommen. Während er früher offenherzig und mitteilsam gewesen war, war er jetzt mißtrauisch und verschlossen geworden, so daß selbst sein neuer ausgezeichneter Gehilfe,

Fig. 54.



Das Tychonische Weltsystem.
Zusammenstellung aus Hofmans „Danske Adelsmaend": links Hveen, Tycho und sein Weltsystem, rechts der später errichtete „Runde Turm", das Fernrohr und die Planeten in ihrer relativen Größe.

Johannes Kepler, Mühe hatte, die nötigen Aufklärungen von ihm zu bekommen. Tycho Brahe starb 1601 und wurde mit kaiserlicher Pracht in der Teinkirche in Prag beigesetzt. Drei Jahre später starb seine Witwe, die an derselben Stelle beigesetzt wurde.

Die Uranienburg geriet schnell in Verfall. Huet, der die Insel im Jahre 1652, und Picard, der sie im Jahre 1671 besuchte, konnten nur mit Mühe die Stelle finden, wo sie gestanden hatte. Die Insel kam durch den Frieden von Kopenhagen 1660 an Schweden, und als 1823 bis 1824 einige Ausgrabungen vorgenommen wurden, fand man fast gar nichts, aber doch den Deckstein über dem Niedergang zur Sternburg mit der (lateinischen)

Digitized by Google

Inſchrift: „Nicht Macht und Reichtum, ſondern die Kunſt führt das Scepter durch die Zeiten.“

§ 72. Johannes Kepler war 1571 zu Weil der Stadt in Württemberg geboren. In Abweſenheit ſeiner Eltern — ſein Vater hatte ſich im Heere Albas anwerben laſſen — erhielt er ſeine erſte Erziehung bei ſeinen Großeltern. Nachdem ſeine Eltern zurückgekehrt waren, erhielt er am Wohnort derſelben, Leonberg und ſpäter Ellmendingen in Baden, einen ziemlich

Fig. 55.

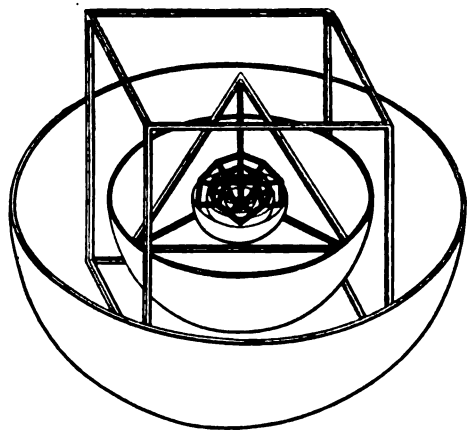
Johannes Kepler.

dürftigen Unterricht, beſuchte aber dann die Kloſterſchulen zu Hirſau und Maulbronn und bezog dann die Univerſität Tübingen, um Theologie zu ſtudieren. Hier fand er in dem Aſtronomen und Mathematiker Mäſtlin, der ein kenntnisreicher Mann und Anhänger der kopernikaniſchen Lehre war, nicht nur einen ausgezeichneten Lehrer, ſondern auch einen treuen Freund für das ganze Leben. Seiner Empfehlung hatte er zu verdanken, daß er im Alter von 22 Jahren Profeſſor der Mathematik in Graz wurde. Hier ver-

Digitized by Google

faßte er Kalender und gab eine Schrift [1]) heraus, in der er namentlich eine eigentümliche Regel für die Entfernungen der Planeten von der Sonne aufstellte. Kepler fand, daß von den fünf regelmäßigen Körpern je einer zwischen zweien der sechs Planeten so angebracht werden kann, daß sich ein Planet auf der Kugel bewegt, die durch die Ecken des Körpers geht, und einer auf der Kugel, die die Flächen des Körpers berührt (umgeschriebene und eingeschriebene Kugel). So läßt sich zwischen Merkur und Venus ein Oktaeder, zwischen Venus und Erde ein Ikosaeder, zwischen Erde und Mars ein Dodekaeder, zwischen Mars und Jupiter ein Tetraeder, zwischen Jupiter und Saturn ein Hexaeder (Würfel) legen. Die Regel stimmt nicht ganz genau, erinnert aber an die Zahlenphilosophie (Pythagoras), und das Buch hatte die Wirkung, daß man auf Kepler aufmerksam wurde, unter anderen auch Tycho Brahe, der sich damals in Wandsbeck befand. Er schrieb an Kepler und lud ihn ein, zu ihm zu kommen. Übrigens wurde Kepler durch die genauen Beobachtungen Tycho Brahes von diesen minder glücklichen Spekulationen abgelenkt, und eben diese Beobachtungen waren es, die ihn in den Stand setzten, die wahren Gesetze der Planetenbewegung zu erkennen.

Fig. 56.



Die regulären Körper und die Planeten.

Kepler verheiratete sich mit einer jungen Witwe, mußte aber mit seiner Familie Graz verlassen, weil der junge Erzherzog Ferdinand, der von den Jesuiten erzogen worden war, der heiligen Jungfrau geschworen hatte, den Protestantismus in seinem Lande auszurotten. Tycho Brahe hatte von Prag aus Kepler von neuem eingeladen, als dieser bereits unterwegs war. Zwar hatte sich Mästlin bemüht, ihm eine Stelle in Württemberg zu verschaffen, allein vergebens. Er mußte sich daher mit der von Tycho Brahe gebotenen Stellung begnügen, der infolge seines Zustandes durchaus kein angenehmer Herr war, und es trug auch nicht zur Besserung der Verhältnisse bei, daß Keplers Gemahlin der Ansicht war, ihr Mann hätte diese untergeordnete Stellung nicht annehmen dürfen.

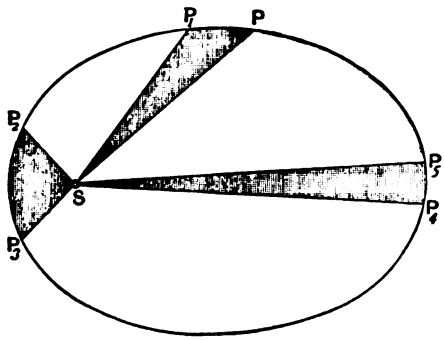
§ 73. Nach Tycho Brahes bald darauf erfolgtem Tode wurde Kepler kaiserlicher Astronom, allerdings nur mit der Hälfte des Gehaltes, den Tycho Brahe bezogen hatte. Was die Stellung noch schwieriger machte, war der

[1]) Prodromus dissertationum cosmographicarum continens: Mysterium cosmographicum.

Digitized by Google

Umstand, daß die kaiserliche Schatzkammer sehr oft nicht in der Lage war, Kepler den Gehalt auszuzahlen. Auch die Witwe und die Kinder Tycho Brahes hatten für dessen Instrumente keine angemessene Bezahlung bekommen. Die Folge davon war, daß Kepler oft Not litt, und da er kein Geld für astronomische Instrumente hatte, so verwendete er seine Zeit zum Teil auf Studien über das Licht und das Auge, von denen später noch die Rede sein wird. Zu den Nahrungssorgen kamen noch Familiensorgen. Seine Mutter wurde in einen Hexenprozeß verwickelt, seine Frau wurde gemütskrank und drei seiner Kinder starben.

Fig. 57.



Eine Planetenbahn.

Unter dem Drucke solcher unerquicklichen Verhältnisse machte Kepler seine unsterblichen Entdeckungen und fand die Gesetze, die für immer seinen Namen tragen werden. Bei der Berechnung der Bewegung des Mars aus den Resultaten von Tycho Brahes Messungen ergab sich, daß die Bahn des Planeten eine Ellipse (Fig. 57) mit der Sonne S in dem einen Brennpunkt ist. Dasselbe ergab sich für die übrigen Planetenbahnen, die sämtlich weniger gestreckt (exzentrisch) sind als die Marsbahn.

Das zweite Keplersche Gesetz betrifft die Geschwindigkeit der Planeten in verschiedenen Punkten ihrer Bahn. Die Geschwindigkeit ist am größten, wenn der Planet der Sonne am nächsten ist, und am kleinsten, wenn er von der Sonne am weitesten entfernt ist. Kepler fand, daß, wenn man sich einen Strahl von der Sonne (radius vector) denkt, der die Bewegung des Planeten mitmacht, dieser Strahl in gleichen Zeiten gleiche Flächenstücke beschreibt. In der Figur bezeichnen die Sektoren SPP_1, SP_2P_3 und SP_4P_5 Flächenstücke, die der radius vector an verschiedenen Stellen der Bahn in gleichen Zeiten beschreibt. Das dritte Keplersche Gesetz gibt den Zusammenhang zwischen der mittleren Entfernung der Planeten von der Sonne und der Umlaufszeit an. Die Quadrate der Umlaufszeiten verhalten sich wie die dritten Potenzen der mittleren Entfernungen. Setzt man z. B. die Entfernung der Erde von der Sonne gleich 1 und die Umlaufszeit (ein Jahr) ebenfalls gleich 1, so ist für Jupiter die Entfernung 5,2 und die Umlaufszeit 11,9. Es ist aber $\frac{1^3}{5{,}2^3} = \frac{1^2}{11{,}9^2}$. Beide Nenner sind ungefähr 141.

Die beiden ersten Gesetze veröffentlichte Kepler in der „Astronomia nova“ (Prag 1609), das dritte in der „Harmonices mundi“ (Linz 1619).

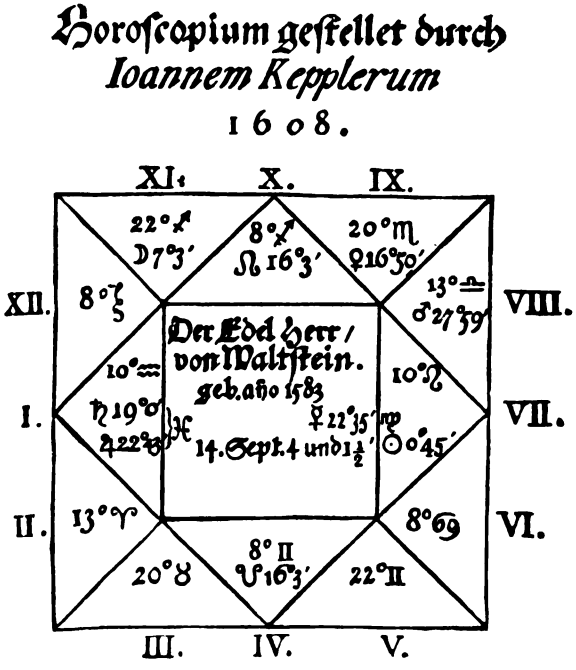
Digitized by Google

Die drei Keplerschen Gesetze sind nicht nur absolut richtig, sondern sie enthalten auch eine vollkommen erschöpfende Beschreibung der Bahnen, der Geschwindigkeit, der Entfernung von der Sonne und der Umlaufszeit der Planeten. Sie bilden, wie wir später sehen werden, die Grundlage für die Theorie der Kräfte, welche die Planeten in ihren Bahnen führen und von denen auch Kepler, wie es scheint, eine Ahnung gehabt hat.

Über die Hilfsmittel, die Kepler in den Stand setzten, seine wichtigen Entdeckungen zu machen, äußert er sich selbst im Vorwort zur „Astronomia nova“ folgendermaßen: „Die Astronomen wußten diesen Kriegsgott (Mars) nicht zu überwältigen. Aber der vortreffliche Heerführer Tycho hat in zwanzigjährigen Nachtwachen seine Kriegslisten erforscht, und ich umging mit Hilfe des Laufes der Mutter Erde alle seine Krümmungen.“ Mit dem letzten Satz deutet Kepler offenbar darauf hin, daß er seine Berechnungen unter der Voraussetzung ausführte, daß sich die Erde um die Sonne bewegt.

§ 74. Trotzdem der Kaiser bei verschiedenen Gelegenheiten die Dienste Keplers in Anspruch nahm, z. B. auf dem Reichstag zu Regensburg, um

Fig. 58.



Wallensteins Horoskop, gestellt von Kepler.

die Einführung des neuen Kalenders durchzusetzen, hatte Kepler doch nach wie vor mit Entbehrungen zu kämpfen. Er erhielt allerdings eine etwas bessere Stellung als Lehrer der Mathematik an der Landschaftsschule in Linz,

Digitized by Google

indem er seine Stellung als Hofastronom beibehielt, allein das Geld, welches ihm Kaiser Ferdinand II. für die Veröffentlichung der Rudolfinischen Tafeln versprochen hatte, wurde nicht ausgezahlt. Der Kaiser gab ihm eine Anweisung auf die Reichsstädte Nürnberg, Ulm und Memmingen, von denen jedoch nur die beiden letzten die verlangte Summe bezahlten. Inzwischen wurde mit dem Drucke des Werkes in Ulm begonnen. Wegen der 12000 Gulden, die er noch zu bekommen hatte, wurde er an Wallenstein gewiesen, der mit Mecklenburg belehnt war. Kepler begab sich zu Wallenstein, den er in Sagan in Schlesien traf. Wallenstein, der ein Anhänger der Astrologie war, empfing zwar Kepler und ließ sich von ihm das Horoskop stellen (Fig. 58), aber von den 12000 Gulden wollte er nichts wissen. Dagegen bot er Kepler eine Professur in Rostock an, die dieser jedoch ablehnte. Verzweifelt über diese Behandlung machte sich Kepler auf den Weg nach Regensburg, um dort vor dem Reichstag seine Ansprüche geltend zu machen. Hier starb er infolge der Anstrengungen der Reise wenige Tage nach seiner Ankunft am 15. November 1630. Er wurde außerhalb der Wälle beerdigt, aber sein Grab wurde zwei Jahre später während der Belagerung und Erstürmung der Stadt durch die Sachsen und Schweden zertreten und unkenntlich gemacht, so daß man die Ruhestätte Keplers nicht kennt. Im Jahre 1808 ließ ihm in den Anlagen, die inzwischen aus den Wällen hervorgegangen waren, der Fürst von Dalberg ein Denkmal errichten. Auch in seiner Vaterstadt Weil der Stadt wurde ihm (1870) ein Denkmal errichtet. Über sein Werk hat sich Kepler selbst (in der Harmonices mundi, am Schlusse von Kap. IX des fünften Buches) in folgender Weise ausgesprochen: „Ich danke Dir, Herr und Schöpfer, daß Du mich an Deiner Schöpfung ergötzt hast, und daß ich über den Werken Deiner Hände frohlockt habe. Ich habe die Herrlichkeit Deiner Werke den Menschen geoffenbart, so viel von ihrer Unendlichkeit mein beschränkter Verstand zu fassen vermochte. Habe ich etwas vorgebracht, was Deiner unwürdig ist, oder habe ich eigenen Ruhm bei den Menschen gesucht, so vergieb mir in Gnaden."

Digitized by Google

Digitized by Google

Das Licht.

Von den älteſten Zeiten bis auf Newton.

Digitized by Google

Digitized by Google

Das Licht.

§ 75. Die erste Äußerung des Bewußtseins bei einem Kinde ist die Fähigkeit, „sehen" zu können, d. h. zu wissen, daß in der Richtung, aus welcher das Licht kommt, sich ein Gegenstand befindet. Dies wird ohne Zweifel erst durch die Erfahrung gelernt und kann nicht als angeboren betrachtet werden. Als Beweis dafür kann angeführt werden, daß ein Franzose, dessen Augenlider von Kindheit verwachsen waren und durch eine Operation geöffnet wurden, als er über 30 Jahre alt war, dabei nichts Außergewöhnliches bemerkte, sondern das Sehen erst lernen mußte.

Die Erkenntnis, daß etwas in der Richtung ist, in der man es sieht, wird durch Tausende von Erfahrungen bestätigt. Jedesmal, wenn wir einen Gegenstand ergreifen oder berühren, bekommen wir eine neue Bestätigung davon. Es gibt daher kaum ein anderes Mittel, durch das man so mannigfaltige und vollkommene Sinnestäuschungen hervorbringen kann, als dadurch, daß man das Licht durch Mittel, die wir später kennen lernen werden, auf einem anderen als dem direkten Wege von dem Gegenstand nach dem Auge kommen läßt.

Der Satz findet vielfache praktische Anwendung zur Erzielung großer Genauigkeit. Wenn man über zwei Punkte hinaus nach einem dritten „visiert", so setzt man dabei voraus, daß die drei Punkte in einer geraden Linie liegen, wenn sie in derselben Visierlinie gesehen werden. So überzeugt sich ein Feldmesser davon, ob eine Anzahl von Stäben in gerader Linie liegen, und ein Schreiner, ob eine Kante vollkommen gerade ist, dadurch, daß er beobachtet, ob alle Punkte der Kante in derselben Visierlinie liegen u. s. w.

Die Tatsache, welche diesen Beobachtungen zu Grunde liegt, ist die, daß sich das Licht geradlinig fortpflanzt. Dieser Satz wurde von den Griechen bereits im 5. Jahrhundert v. Chr. ausgesprochen, und ebenso wie die unbewußte Auffassung desselben beim Kinde die erste Äußerung des Bewußtseins bezeichnet, so bildet das erstmalige bewußte Aussprechen desselben das erste Beispiel der Aufstellung eines Naturgesetzes, wenn wir unter einem solchen einen kurzen und treffenden Ausdruck für das Gemeinsame in einer Mannigfaltigkeit der Erscheinungen verstehen, die im übrigen außerordentlich verschiedenartig sein können.

Digitized by Google

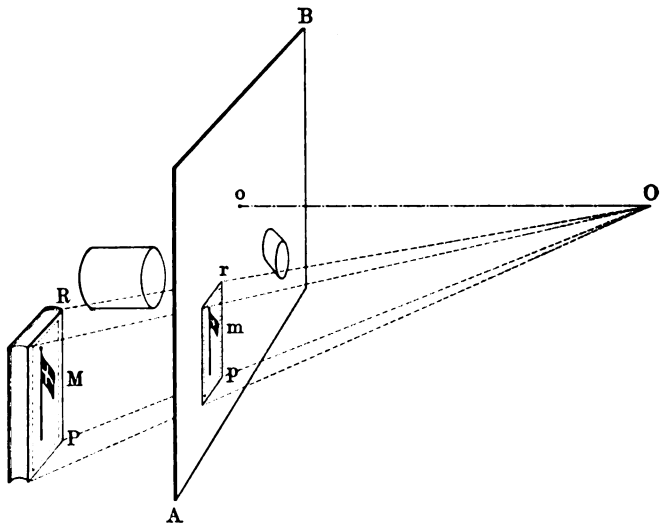
§ 76. Die Aufstellung dieses Gesetzes bildet ein ausgezeichnetes Beispiel dafür, einen wie wichtigen Schritt man tut, wenn man von der unbewußten Anwendung eines Gesetzes zum bewußten Aussprechen desselben übergeht.

Bei der Aufführung der griechischen Schauspiele im 5. Jahrhundert benutzte man eine Bühne von nur geringer Tiefe. Um besser auf die Phantasie zu wirken, versuchte man den Hintergrund zu bemalen, aber nicht, wie es bei älteren Völkern, z. B. den Chaldäern und den Ägyptern, geschah, mit Bildern, die irgend eine Handlung, ein Handwerk mit großer Genauigkeit darstellten, sondern mit Häusern u. dergl., die aber nicht die Einzelheiten genau darstellten, sondern die die Zuschauer täuschen sollten, deren Aufmerksamkeit auf die Schauspieler gerichtet sein sollte, während der Hintergrund die Wirkung hervorbringen sollte, als ob wirklich Häuser u. dergl. hinter demselben ständen.

So ungefähr wurde die Aufgabe von Agatharkos gestellt und von den Mathematikern Anaxagoras und Demokrit gelöst, die hiermit die Lehre von der Perspektive allein auf dem Satz aufbauten, daß sich das Licht geradlinig fortpflanzt. Demokrit schrieb auch eine „Geradelinienlehre", die leider verloren gegangen ist und die wahrscheinlich die Gesetze der Perspektive behandelte.

Die Grundlage der Perspektive ist die folgende: Zieht man von den verschiedenen Punkten eines Gegenstandes RMP Linien nach dem Auge O,

Fig. 59.



Prinzip der Perspektive.

so erhält das Auge Licht aus den Richtungen RO, MO und PO. Aber aus welcher Entfernung das Licht kommt, empfindet das Auge nicht. Wenn daher nicht von R, sondern statt dessen von einem Punkt r einer Tafel Licht

Digitized by Google

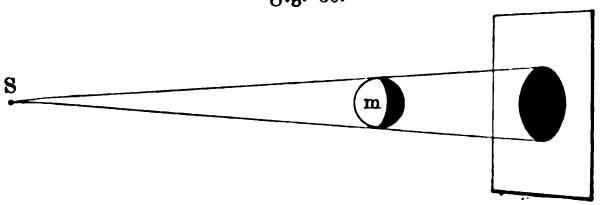
derselben Art herkommt, so muß es dieselbe Wirkung hervorbringen. Daher besteht die Kunst darin, auf der Tafel eine solche Zeichnung herzustellen, daß sie dem Auge Licht von denjenigen Punkten zusendet, in denen die Sehlinien nach dem wirklichen Gegenstand durch die Tafel hindurchgehen. Zur Ausführung des Verfahrens dient eine Reihe von mathematischen Sätzen, welche die Lehre von der Perspektive bilden, auf die wir hier nicht näher eingehen können. Das Naturgesetz der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes bildet so die Grundlage einer ganzen Wissenschaft.

Hinsichtlich der Naturwissenschaften war es vorzugsweise Gedankenarbeit, in der die Griechen ihre Stärke hatten. Sie kannten nur wenige Naturgesetze, aber ihre Befähigung, die wenigen Stücke edlen Metalles, die sie fanden, auszunutzen, muß für alle Zeiten Bewunderung erregen.

§ 77. Ein anderer Zweig der Wissenschaft, der mit der Perspektive nahe verwandt ist, ist die Schattenlehre, die sich auf dasselbe Naturgesetz gründet.

Von einem leuchtenden Punkt S gehen Lichtstrahlen in geraden Linien aus. Ein Teil derselben trifft den rechts von der Lichtquelle aufgestellten Schirm und beleuchtet diesen. Diejenigen Strahlen jedoch, welche den Körper m treffen, erreichen den Schirm nicht, und es entsteht auf diesem eine unbeleuchtete Stelle, der sogenannte Schlagschatten des Körpers. Der Raum

Fig. 60.



Schattenbildung.

zwischen diesem und dem Körper ist der Schatten des letzteren. Die Kunst, den Schlagschatten zu zeichnen, besteht also darin, vom Lichtpunkt S aus die geraden Linien zu ziehen, die den Körper streifen, und zu finden, wo diese Linien den Schirm oder eine andere Fläche treffen. Die Ausübung dieser Kunst bildet die sogenannte Schattenlehre.

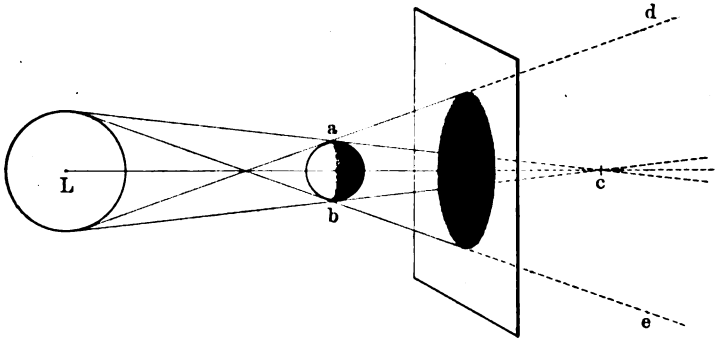
Ist die Lichtquelle nicht ein Punkt, sondern ein Körper, so müssen von jedem seiner Punkte aus Linien gezogen werden, die den schattenwerfenden Körper streifen. Jeder Punkt des leuchtenden Körpers erzeugt dann einen Schlagschatten. Alle diese Schlagschatten legen sich aber mehr oder weniger übereinander. An eine Stelle (die schwarze) kommt gar kein Licht, während andere Stellen (die halbdunkeln) von einem Teile der Lichtstrahlen getroffen werden. An der ersteren Stelle befindet sich der Kernschatten, an den anderen Stellen der Halbschatten (das Wort halb ist nicht buchstäblich zu verstehen). Ist der leuchtende Körper größer als der Gegenstand, so nimmt der Durchmesser des Kernschattens ab, wenn der Schirm entfernt wird. Kommt er

Digitized by Google

über den Punkt c hinaus, so fällt überhaupt kein Kernschatten auf ihn. Der Halbschatten dagegen wird mit der Entfernung größer, ebenso der Kernschatten, wenn der leuchtende Körper kleiner ist als der schattenwerfende.

§ 78. Bei den Griechen scheint etwas Meinungsverschiedenheit darüber geherrscht zu haben, ob der Vorgang des Sehens auf etwas beruht, das vom Auge ausgeht, oder auf etwas, das von dem leuchtenden Gegenstande ausgeht. Aristoteles ist der letzteren Ansicht, daß nämlich das Licht eine Wirkung ist,

Fig. 61.



Kernschatten und Halbschatten.

die vom Gegenstand ausgeht und auf das Auge wirkt, denn sonst würde man ebensogut im Dunkeln sehen können. Es beruht vielleicht auf einem Mißverständnis, wenn man verschiedenen Philosophen die Ansicht zugeschrieben hat, daß die Wirkung vom Auge ausgeht. Wenn man auch in der Perspektive die geraden Linien vom Auge nach Punkten des Gegenstandes zieht, und wenn sich Demokrit in seiner „Geradelinienlehre" vielleicht so ausgedrückt hat, so folgt daraus nicht, daß er damit hat sagen wollen, daß die Lichtwirkung oder die Sehwirkung diesen Weg gehe. Für die Entwickelung der Lehre von der Perspektive ist es nämlich ganz gleichgültig, welchen Weg das Licht geht; das einzige, worauf es ankommt, ist, daß es in gerader Linie geht. Es ist aber das bequemste, die Sehlinien vom Auge aus zu ziehen.

Wenn ein Mann wie Ptolemäus in seiner Optik die Strahlen als etwas vom Auge Ausgehendes bezeichnet, so geschah dies vielleicht nur deshalb, weil man damals nicht das mindeste über die Richtung wußte, in welcher sich das Licht fortpflanzt. Ptolemäus beschreibt sie so, wie es mathematisch am einfachsten ist, ebenso wie er die Bewegung der Himmelskörper so auffaßte, wie sie sich dem Auge darbietet.

Wenn Plato meinte, daß sowohl der Gegenstand, als auch das Auge wirksam sei, hätte er einen ähnlichen Beweis geben können wie Aristoteles, nämlich daß man nicht ohne Licht sehe, daß man aber auch nicht ohne Auge sehe.

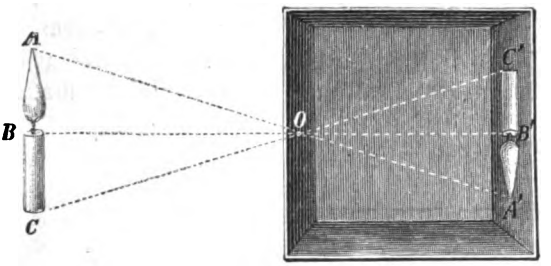
Erst verhältnismäßig spät in der neueren Zeit hat man durch den Ver-

Digitized by Google

sich festgestellt, in welcher Richtung sich das Licht bewegt. Durch Philosophieren läßt sich so etwas nicht entscheiden.

§ 79. Etwas anderes, was ebenfalls durch die geradlinige Fortpflanzung des Lichtes seine Erklärung findet, ist die Dunkelkammer (camera obscura). Ein Kasten oder ein Zimmer ist so eingerichtet, daß das Licht nur durch eine einzige kleine Öffnung *O* (Fig. 62) eindringen kann. Auf der gegenüber liegenden Wand entsteht dann ein Bild der vor der Öffnung befindlichen Gegenstände. Das Licht, welches vom Punkt *A* des Gegenstandes ausgeht und durch die Öffnung *O* eintritt, trifft und beleuchtet den Punkt *A'*. Ebenso treffen die von *B* und *C* ausgehenden Strahlen die Wand in den Punkten *B'* und *C'*. Das Bild ist also ein umgekehrtes, und es ist gerade so groß, größer oder kleiner als der Gegenstand, je nachdem es von der Öffnung *O* ebenso weit, weniger weit oder weiter entfernt ist als der Gegenstand.

Fig. 62.



Die einfache Dunkelkammer.

Das Bild wird in der Regel nicht sehr lichtstark sein, da von den verschiedenen Punkten des Gegenstandes nur wenig Licht durch die Öffnung eintreten kann. Vergrößert man die Öffnung, so beleuchtet das von einem Punkte des Gegenstandes ausgehende Licht eine größere Stelle der Wand, eine Stelle, die größer ist als die Öffnung. Es entsteht dann allerdings auch ein Bild, aber es ist nicht scharf, denn dazu ist erforderlich, daß ein Punkt durch einen Punkt und nicht durch einen mehr oder weniger großen Lichtfleck wiedergegeben wird. Die Öffnung darf daher nicht zu groß sein, und trotz der geringen Lichtstärke kann man ein solches Bild recht deutlich sehen, wenn man sich einige Zeit im Dunkeln aufhält, weil dann das Auge gegen geringe Lichtunterschiede empfindlicher wird.

§ 80. Wer die Dunkelkammer zuerst benutzt hat, weiß man nicht sicher. Roger Bacon spricht von ihr und ist vielleicht der Erfinder. Er war einer der ersten bedeutenden Männer an den neuen europäischen Universitäten und hat sich viel mit Untersuchungen über das Licht beschäftigt.

Roger Bacon war als Sohn angesehener Eltern 1214 zu Ilchester in Somerset geboren. Er studierte erst in Oxford und dann in Paris Lateinisch, Griechisch, Hebräisch und Arabisch, später Mathematik, Astronomie und Naturlehre. Als sehr gelehrter Mann erhielt er 1240 eine Stelle als Lehrer in Oxford. Er war, wie die meisten Gelehrten der damaligen Zeit, Mönch. Die Unwissenheit und Unsittlichkeit seiner Ordensbrüder (Franziskaner) erregten seinen Unwillen, und er unterließ es nicht, ihnen deswegen Vorwürfe

Digitized by Google

zu machen. Ferner war er ſo unvorſichtig, offen auszuſprechen, daß die Schriften des Ariſtoteles ein Hindernis für jeden Fortſchritt ſeien, ja er ſoll ſogar geäußert haben: „Wenn ich könnte, würde ich ſämtliche Schriften des Ariſtoteles verbrennen.“ Da er ſich außerdem mit Dingen befaßte, die man nicht verſtand (Dunkelkammer), war es für ſeine Feinde nicht ſchwer, ihn als Zauberer und Ketzer zu verdächtigen, was zur Folge hatte, daß er ins Gefängnis geworfen wurde, in dem er den größten Teil ſeines ſpäteren Lebens zugebracht hat. Er wurde zwar im Jahre 1265, als ein Gönner von ihm unter dem Namen Clemens IV. den päpſtlichen Stuhl

Fig. 63.

Roger Bacon.

beſtieg, freigelaſſen, aber nur für eine kurze Reihe von Jahren. In dieſer Zeit ſchrieb er das „Opus majus“ über die Natur, durch das er auch den Beweis liefern wollte, daß es natürliche Dinge waren, mit denen er ſich beſchäftigte. Er iſt ferner, wie es ſcheint, der erſte geweſen, der mit dem Vorſchlage einer Kalenderverbeſſerung hervortrat, auf den ſich Clemens IV. jedoch nicht einließ. Erſt 300 Jahre ſpäter war die Zeit für eine ſolche Verbeſſerung gekommen.

Im Jahre 1278 wurde Bacon auf Betreiben des Franziskanergenerals von neuem verurteilt und in Frankreich, wohin er ſich begeben hatte, eingekerkert. Erſt im Jahre 1288 wurde er wieder freigelaſſen. Die letzten vier oder ſechs Jahre ſeines Lebens brachte er in Oxford zu, und er ſoll es beklagt haben, daß er ſich ſo viele Mühe gegeben habe, die Wiſſenſchaft zu fördern.

Digitized by Google

Bacons „großes Werk“ ist ein merkwürdiges Buch. Über verschiedene Punkte enthält es keine ausführlichen Erklärungen, sondern nur Andeutungen. Aber diese Andeutungen gehen doch so weit, daß man in ihnen die Erfindung des Fernrohres, des Luftballons, des Dampfwagens u. s. w. zu erkennen geglaubt hat. Außer anderen Sachen aus der Lichtlehre findet sich in dem Buche auch die Dunkelkammer erwähnt.

§ 81. Die letztere wurde später für astronomische Zwecke gebraucht. Namentlich Tycho Brahe und später Kepler benutzten sie zur Erzeugung eines Sonnenbildes. Durch Messung des Durchmessers des Bildes und der Entfernung desselben von der kleinen Öffnung ermittelte man den Sehwinkel

Fig. 64.

Sonnenbilder auf dem Waldboden.

(die scheinbare Größe) der Sonne. Ebenso benutzte man sie, um bei Finsternissen die Größe des verfinsterten Teiles der Sonne oder des Mondes zu messen. Ja Kepler beobachtete sogar einen Fleck auf dem Sonnenbilde, den er (irrtümlicherweise) für den Merkur hielt.

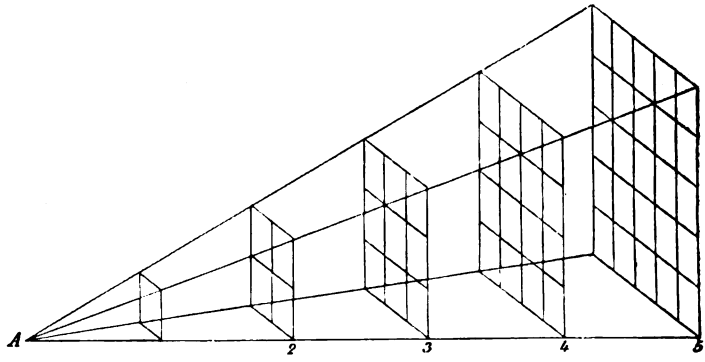
In Wäldern mit hohen Bäumen und dichten Kronen beobachtet man oft bei Sonnenschein auf dem Boden längliche Lichtflecke (Fig. 64). Dies

Digitized by Google

sind Sonnenbilder, irgend ein Zwischenraum zwischen den Blättern ist die Öffnung und der Waldboden ist die Wand der Dunkelkammer. Die Form der Öffnung ist nebensächlich, wenn sie nur klein genug ist. Die Gesamtheit der unendlich vielen kleinen Lichtflecke, die den unendlich vielen Punkten des Gegenstandes entsprechen, geben doch ein Bild des Gegenstandes. Diese Erklärung ist von dem Griechen Maurolykos gegeben worden. Daß sie oval und nicht kreisrund sind, hat seinen Grund darin, daß der Waldboden gegen die Richtung der Strahlen geneigt ist. Läßt man die Strahlen senkrecht auf eine Ebene fallen, so sind die Bilder auf dieser kreisrund. Ist die Sonne verfinstert, so sind es die Bilder selbstverständlich ebenfalls.

§ 82. Eine wichtige Folgerung aus dem Gesetze von der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes bildet die Abnahme der Helligkeit bei zunehmender Entfernung. Die von der Lichtquelle *A* (Fig. 65) ausgehende Lichtmenge,

Fig. 65.



Abnahme der Helligkeit mit der Entfernung.

welche in einer gewissen Entfernung auf einen quadratischen Schirm fällt, trifft nämlich in der doppelten Entfernung einen Schirm von doppelter Seitenlänge, also von vierfacher Oberfläche, in der dreifachen Entfernung einen Schirm von dreifacher Seitenlänge, also von neunfacher Oberfläche, u. s. w. Ein Schirm von der Größe des ersten wird also in der doppelten, dreifachen u. s. w. Entfernung nur von einer Lichtmenge getroffen, die gleich dem vierten, neunten u. s. w. Teil derjenigen Menge ist, in der er in der einfachen Entfernung getroffen wird. Die Helligkeiten in zwei verschiedenen Entfernungen von der Lichtquelle verhalten sich also umgekehrt wie die Quadrate dieser Entfernungen.

Beispiel. Wenn ich in einer Entfernung von 4 m von einer Lichtquelle zur Not in einem Buche lesen kann und ich will in einer Entfernung von 12 m von der Lichtquelle lesen, so muß diese neunmal so stark sein als die erste.

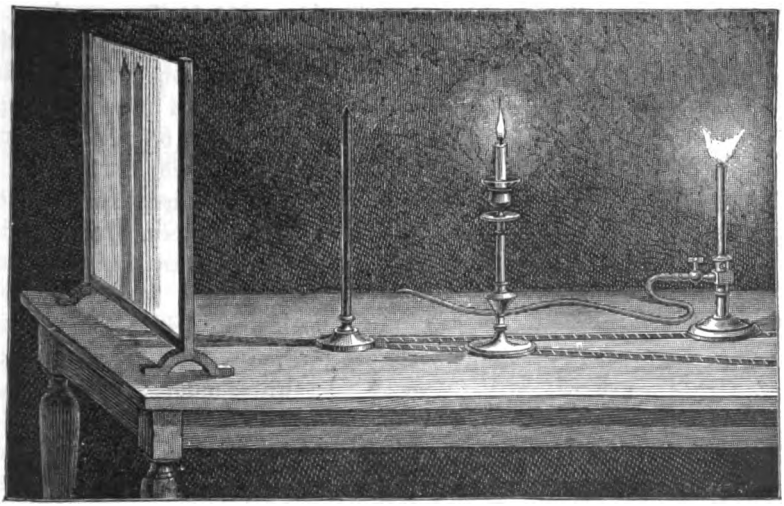
Das Gesetz von der Abnahme der Helligkeit gilt natürlich nur unter der Voraussetzung, daß unterwegs kein Licht verloren geht.

§ 83. Wenn man die Stärke zweier Lichtquellen miteinander vergleichen

Digitized by Google

will, so kann man sie in einem solchen Abstande von einem Schirm anbringen, daß sie diesen gleich stark beleuchten. Man verfährt dabei nach **Rumford** (1753 bis 1814) so, daß man jede der beiden Lichtquellen den Schatten eines Stabes auf den Schirm werfen läßt (Fig. 66). Ist die Wirkung der

Fig. 66.



Vergleichung von Lichtstärken.

beiden Lichtquellen ungleich, dann sind die Schatten ungleich dunkel. Die Lichtquelle, welche den stärkeren Schatten wirft, muß dann entfernt oder die andere genähert werden, bis die beiden Schatten gleich stark sind. Die Lichtstärken verhalten sich dann wie die Quadrate der Abstände der Lichtquellen vom Schirm.

Beispiel 1. Eine Stearinkerze in 60 cm Entfernung und eine Petroleumlampe in 210 cm Entfernung geben gleich starke Schatten. Wieviel Kerzen kann die Petroleumlampe ersetzen?

Beispiel 2. Die Lichtwirkung einer Wachskerze in 3 m Abstand von einer Wand ist gleich der des Mondes. Wievielmal leuchtet der Mond stärker als die Wachskerze? (Antw. 16×10^{13}.)

Beispiel 3. In einer Dunkelkammer hat die runde Öffnung einen Durchmesser von 0,5 mm, das Sonnenbild an der gegenüberliegenden Wand einen Durchmesser von 5 cm. Der letztere ist also 100 mal so groß als der erstere. Also ist die Helligkeit des Bildes der 10 000. Teil von der Helligkeit, die die Sonne direkt erzeugt. Wenn nun ein Wachslicht in einer Entfernung von 40 cm von der Wand dieselbe Helligkeit erzeugt wie die des Sonnenbildes, wieviel Wachskerzen müßten sich in der Entfernung der Sonne befinden, um dieselbe Lichtwirkung hervorzubringen?

Digitized by Google

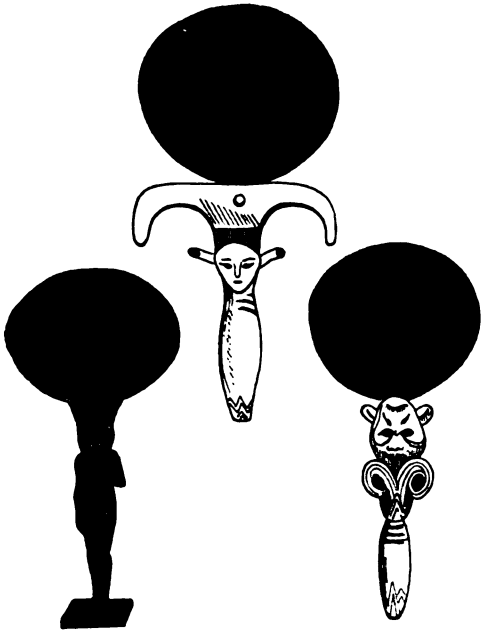
Beispiel 4. Wievielmal leuchtet auf der Erde die Sonne stärker als der Mond?

Beispiel 5. Wievielmal Licht geht von der Sonne mehr aus als vom Mond?

§ 84. Die klare Erkenntnis des zweiten Gesetzes, zu welchem wir jetzt kommen, verdankt man ebenfalls den Griechen, während die Erfahrung in dieser Richtung ebenfalls so alt wie das Menschengeschlecht ist.

Um zu beobachten, daß sich die Gegenstände im stehenden Wasser spiegeln, dazu bedarf es keiner höheren Kultur. Aber man weiß auch, daß die ältesten Kulturvölker künstliche Spiegel aus Metall besaßen. Kupferne Spiegel sind in Ägypten in den Mumiengräbern aufgefunden worden, Homer spricht von goldenen Spiegeln, und die Römer benutzten in den ältesten Zeiten Spiegel aus Bronze, beim Beginne unserer Zeitrechnung solche aus Gold und Silber.

Fig. 67.



Alte ägyptische Metallspiegel.

Eine Mischung, die ein gutes Spiegelmetall gibt, besteht aus 68½ Proz. Kupfer und 31½ Proz. Zinn. Ein Zusatz von etwas Blei macht sie leichter zu bearbeiten, und ein Zusatz von etwas Arsen verleiht ihr eine hellere Farbe.

Geschliffene Spiegel aus dunklem Glase waren bei den Phöniciern in Gebrauch. Durchsichtiges, auf der Rückseite mit Blei belegtes Glas hat wohl kaum vor dem 13. Jahrhundert n. Chr. Anwendung gefunden. Das Glas auf der Rückseite mit Amalgam (Zinn und Quecksilber) zu belegen, kam im 14. Jahrhundert in Gebrauch. Wer die Erfinder dieser beiden Verfahren gewesen sind, ist nicht bekannt. Wahrscheinlich waren es Handwerker. In neuerer Zeit werden die amalgamierten Spiegel mehr und mehr durch versilberte Spiegel verdrängt.

§ 85. Die unmittelbare Erfahrung lehrt, daß ein ebener Spiegel ein Bild erzeugt, welches ebenso weit hinter dem Spiegel liegt wie der Gegenstand vor dem Spiegel, und zwar senkrecht hinter dem Spiegel.

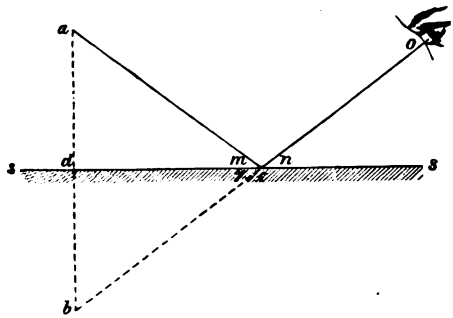
Jeder spiegelglatte See oder Teich zeigt daher ein Bild der höheren

Digitized by Google

Gegenstände ebenso tief unter der Wasseroberfläche, als sich diese selbst über dieser Fläche befinden.

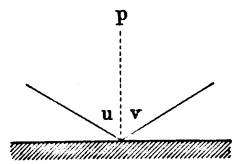
Aber erst die Griechen im 5. oder 4. Jahrhundert v. Chr. haben, wie es scheint, das Gesetz der Spiegelung richtig erkannt. Ist *a* (Fig. 68) ein leuch-

Fig. 68.



Zurückwerfung eines Lichtstrahles.

Fig. 69.



Gleichheit von Einfallswinkel und Reflexionswinkel.

tender Punkt, *ss* eine Spiegelfläche, *o* das Auge, so erhält dieses denselben Eindruck, als ob sich hinter dem Spiegel ein leuchtender Punkt *b* befände und der Spiegel gar nicht da wäre, also als ob das Auge von einem Lichtstrahl *bo* getroffen würde. Dies kann jedoch nicht der Fall sein, denn hinter dem Spiegel ist kein Lichtstrahl und der Spiegel ist für Licht undurchdringlich, wenigstens wenn es ein Metallspiegel ist. Das Licht hat also nicht den ganzen Weg *bo*, sondern nur den Weg *co* zurückgelegt, und nach dem Punkt *c* ist es auf gerader Linie von der Lichtquelle *a* gekommen. Das Licht ist also auf dem Wege *aco* von *a* nach *c* gekommen. Wie läßt sich nun dieser Weg näher bestimmen?

Da *ad* gleich *bd* ist und *ab* auf *cd* senkrecht steht, so ist leicht einzusehen, daß das Dreieck *bcd* mit dem Dreieck *acd* zusammenfallen würde, wenn es um *cd* gedreht würde. Also müssen die Winkel *m* und *n* gleich groß sein. Die Winkel *r* und *n* sind aber ebenfalls gleich, weil sie von zwei sich schneidenden Geraden gebildet werden (Scheitelwinkel). Folglich müssen auch die Winkel *m* und *n* gleich groß sein. Dieser Satz, den die Griechen fanden und der also das Gesetz für den Weg bildet, den das Licht bei der Spiegelung nimmt, wird gewöhnlich so ausgesprochen: **Bei der Spiegelung ist der Einfallswinkel gleich dem Zurückwerfungswinkel** (Reflexionswinkel).

Es ist übrigens gebräuchlicher, nicht die Winkel *m* und *n*, sondern die Winkel *u* und *v* (Fig. 69) als Einfallswinkel und Zurückwerfungswinkel zu bezeichnen, also die Winkel, welche der einfallende und der zurückgeworfene Strahl mit der Senkrechten auf die Ebene des Spiegels (Einfallslot) bilden. Diese beiden Winkel sind selbstverständlich ebenfalls gleich groß.

§ 86. Macht man den Reflexionswinkel zum Einfallswinkel, d. h. bringt man den leuchtenden Punkt in *o* (Fig. 68) an, so wird der Einfallswinkel

Digitized by Google

zum Reflexionswinkel, so daß ein Auge in *a* Licht aus der Richtung *ca* bekommt.

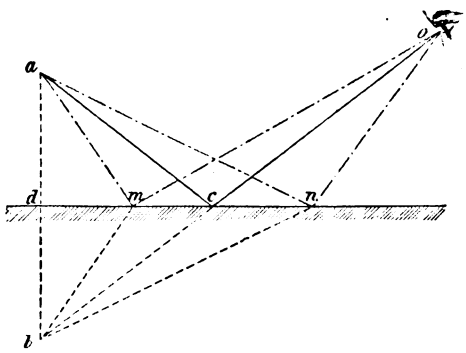
Ein griechischer Naturforscher und Mathematiker in Alexandria, Heron, der im 2. Jahrhundert n. Chr. lebte und der ein vortreffliches Werk über Luft und Dampf geschrieben hat, hat darauf hingewiesen, daß nicht nur der geradlinige Lichtstrahl den kürzesten Weg vom leuchtenden Punkt nach dem Auge geht, sondern daß ein Lichtstrahl auch bei der Spiegelung den kürzesten Weg geht. Ist *a* (Fig. 70) der leuchtende Punkt, *ab* senkrecht auf dem Spiegel und *ad* gleich *bd*, dann ist:

$$am = bm, \text{ also } amo = bmo;$$
$$ac = bc, \text{ also } aco = bco;$$
$$an = bn, \text{ also } ano = bno.$$

Von den drei letzteren Linien ist aber offenbar *bco* die kürzeste, da sie die gerade Linie zwischen *b* und *o* ist. Also muß auch *aco* kleiner sein als *amo* und *ano*.

§ 87. Da man vermittelst eines Spiegels einen Lichtstrahl in einer ganz anderen Richtung in das Auge eintreten lassen kann, als er von dem Gegenstande ausgeht, eignet sich der Spiegel in hohem Grade zur Hervorbringung von Sinnestäuschungen. Daß wir uns durch unsere Zimmerspiegel nicht täuschen lassen, hat seinen Grund darin, daß wir an ihre „Vorspiegelungen" gewöhnt sind, zum Teil auch darin, daß sie wohl ohne Ausnahme von einem Rahmen umgeben sind. Sie haben ohne Zweifel eine große Rolle in der „Magie" gespielt, die zur Zeit der Araber in Blüte stand und auch in späteren Jahrhunderten den Astrologen, Kabbalisten und Goldmachern noch gute Dienste leistete, denen es mehr um Täuschung, als um Aufklärung des Publikums zu tun war. Auch in der heutigen Salonmagie spielen sie noch ihre Rolle.

Fig. 70.



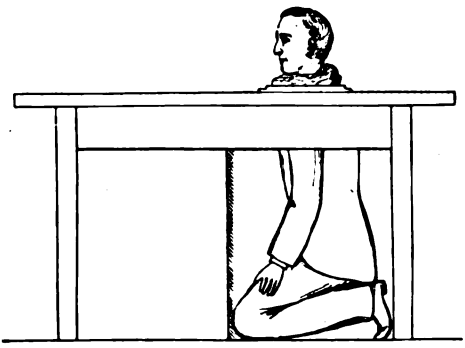
Der Strahl geht bei der Spiegelung den kürzesten Weg.

Ein bekanntes „Wunder" ist der „lebende Kopf ohne Körper". Mitten zwischen den Vorderbeinen und den Hinterbeinen eines Tisches ist ein vertikaler Spiegel angebracht, hinter dem eine Person liegt, die den Kopf durch eine Öffnung in der Tischplatte hindurchsteckt, nachdem der Zauberer einen viereckigen Kasten auf den Tisch gestellt hat und während er das Publikum über die wunderbaren Eigenschaften dieses Kastens belehrt (Fig. 71). Wenn der Kasten hinweggenommen wird, ist der Kopf richtig da, und man sieht

Digitized by Google

unter dem Tiſche, der nur von vier dünnen Beinen getragen wird, hindurch. Was man für die Hinterbeine des Tiſches hält, iſt weiter nichts als das Spiegelbild der Vorderbeine, und ebenſo iſt der Fußboden, den man unter und hinter dem Tiſche ſieht, nichts anderes als das Spiegelbild des Fußbodens unter und vor dem Tiſche.

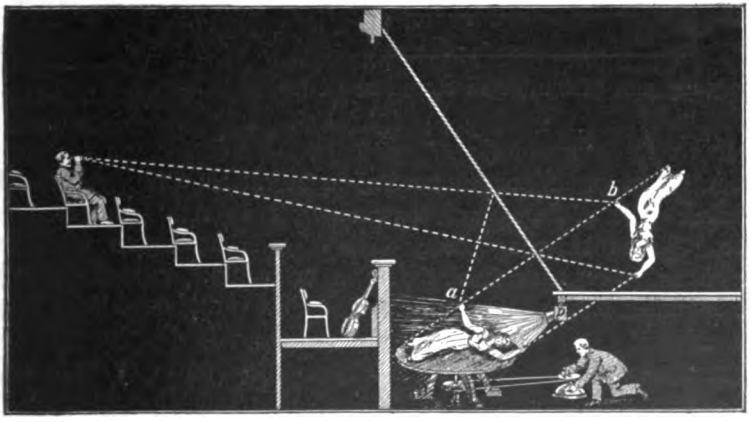
Fig. 71.



Der ſprechende Kopf.

Großes Aufſehen erregte auch die Vorführung einer Dame, die frei in der Luft ſchwebend langſame Bewegungen und Wendungen ausführen konnte. Vorn auf der Bühne iſt ein unbelegter Glasſpiegel in ſchiefer Stellung ſo angebracht, daß er das Spiegelbild *b* einer Perſon *a* (Fig. 72) erzeugt, die auf einer Art Drehſcheibe liegt. Während ſich die Perſon in einer horizontalen Ebene bewegt, bewegt ſich das Spiegelbild in einer verti-

Fig. 72.



Die in der Luft ſchwebende Dame.

kalen Ebene. Da der Spiegel nicht belegt iſt, erzeugt er nur ein ſchwaches Bild, dem aber dadurch abgeholfen wird, daß man die Perſon durch eine für das Publikum unſichtbare Lampe *p* ſtark beleuchtet.

Ein anderes Taſchenſpielerkunſtſtück beſteht in der Vorführung eines Kriegers, deſſen Bruſt von einer Kugel durchbohrt iſt, ſo daß man durch ihn hindurchſehen kann. Das Kunſtſtück wird vermittelſt eines Kaſtens ausgeführt, der von oben geſehen die durch Fig. 73 (a. f. S.) veranſchaulichte Geſtalt hat. Die Täuſchung wird durch die vier Spiegel *m*, *n*, *p*, *r* hervorgebracht.

Digitized by Google

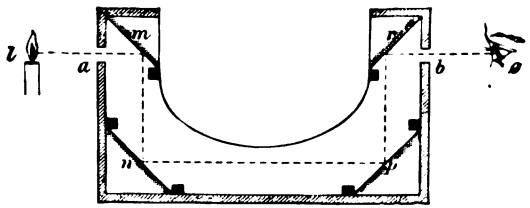
§ 88. Die von einem Spiegel zurückgeworfenen Strahlen wirken, wie gesagt, auf das Auge so, als ob sich hinter dem Spiegel ein Gegenstand von gleicher Größe befände, und zwar in symmetrischer Stellung mit dem wirklichen Gegenstand. Das Spiegelbild einer rechten Hand ist eine linke Hand. „Spiegelschrift" ist umgekehrte Schrift, deren Spiegelbild richtig ist.

Da symmetrische Linien in der Regel eine gewisse Schönheit besitzen, namentlich wenn die Symmetrie vollkommen ist [1]), so bringt die Spiegelung oft eine ansprechende Wirkung hervor, z. B. die Spiegelung einer Landschaft in einem spiegelglatten See.

Derartige Bilder heißen scheinbare Bilder, weil die Strahlen, welche den Eindruck im Auge hervorbringen, gar nicht von der Stelle herkommen, wo man das Bild sieht.

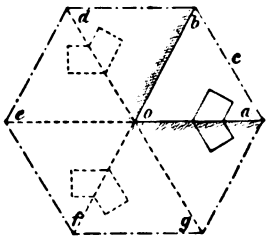
Da aber die Lichtstrahlen so laufen, als ob sie von einem wirklichen Gegenstand kämen, so erzeugen sie, wenn sie einen zweiten Spiegel treffen

Fig. 73.



Vorrichtung zum Hindurchsehen durch eine Person.

Fig. 74.



Durchschnitt durch ein Kaleidoskop.

und von diesem zurückgeworfen werden, in diesem ein Bild, welches sich mit dem ersten Bilde in Bezug auf den zweiten Spiegel in symmetrischer Lage befindet. Fallen die vom zweiten Spiegel zurückkommenden Strahlen auf einen dritten, so erzeugen sie in diesem ein drittes Bild, welches sich in Bezug auf den dritten Spiegel mit dem zweiten Bilde in symmetrischer Lage befindet, u. s. w.

Hierauf beruht das im Jahre 1817 von Brewster (1781 bis 1868) erfundene Kaleidoskop. In Fig. 74 stellen *oa* und *ob* zwei gleich breite Glasplatten vor, die miteinander einen Winkel von 60° bilden. Diese werden zusammen mit einer dritten, aber nicht spiegelnden Platte *c* in ein Rohr vom Ansehen eines Fernrohres geschoben. In dem dem Auge zugewendeten Ende des Rohres befindet sich ein Loch, durch welches man hineinsehen kann. Das andere Ende wird durch zwei Glasplatten verschlossen, zwischen denen sich einige bunte Glasstückchen, Steinchen u. dergl. befinden, die bei der

[1]) Hierauf beruht der angenehme Eindruck, den gedrehte Sachen auf den Schönheitssinn machen. Von welcher Seite man sie auch betrachtet, die Konturen auf beiden Seiten der Achse sind immer symmetrisch.

Digitized by Google

Drehung des Rohres fortwährend in andere Lage kommen. Durch die wiederholte Spiegelung entstehen schöne regelmäßige sternförmige Figuren.

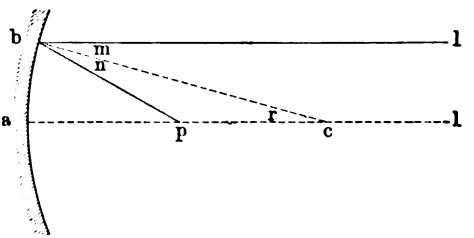
§ 89. Im Altertum wußte man, daß man vermittelst eines Brennspiegels mit den Sonnenstrahlen Feuer entzünden kann. Schon vor der Gründung Roms gab es in Italien einen Vestadienst, bei dem ein heiliges Feuer ununterbrochen in Brand erhalten werden mußte. War es einmal erloschen, so mußte es mit dem reinsten Feuer, dem der Sonne, von neuem angezündet werden, und dies geschah, wie Plutarch erzählt, mit Hilfe des Skaphions, einer Trinkschale, die zugleich als Brennspiegel benutzt werden konnte.

Dagegen scheint die Erzählung, daß Archimedes die römische Flotte aus der Entfernung durch Spiegel angezündet habe, auf einem Mißverständnis zu beruhen.

§ 90. Man hat jedenfalls Brennspiegel benutzt, ehe man ihre Wirkung erklären konnte. Aber das Gesetz der Spiegelung, wie es die Griechen aussprachen — Einfallswinkel gleich Zurückwerfungswinkel — ist hinreichend, um auch die Wirkung nicht ebener Spiegel zu erklären. Die wichtigsten Spiegel mit krummer Oberfläche sind diejenigen, deren Oberfläche ein Stück einer Kugelfläche bildet, die Hohlspiegel (Konkavspiegel, Sammelspiegel) und die Konvexspiegel (Zerstreuungsspiegel). Bei den ersteren ist die innere, bei den letzteren die äußere Oberfläche die spiegelnde.

Ebenso hatte man längst bemerkt, daß in krummen Flächen vergrößerte oder verkleinerte Bilder von Gegenständen entstehen, aber erst Ptolemäus versuchte eine Erklärung mit Hilfe des Spiegelungsgesetzes. Auch die Araber beschäftigten sich sowohl theoretisch als praktisch mit der Frage. Eine vollständige Erklärung für die Wirkung des Hohlspiegels wurde jedoch, wie es scheint, zuerst von Roger Bacon gegeben. Fig. 75 stellt den Durchschnitt durch einen Hohlspiegel vor, dessen Mittelpunkt c ist. Strahlen, welche aus sehr großer Entfernung, z. B. von der Sonne kommen, können als parallel angesehen werden. Derjenige Strahl, welcher durch den Mittelpunkt c geht und den Spiegel in a trifft, wird in derselben Richtung ac zurückgeworfen, da jede Linie von c nach dem Spiegel auf der Stelle, wo sie den Spiegel trifft, senkrecht steht. Der Strahl lb dagegen, der mit cb den Winkel m bildet, wird in der Richtung bp so zurückgeworfen, daß n ebenso groß wie m ist. Da die Strahlen lb und la parallel sind, so sind auch die Winkel r und m gleich groß. Folglich ist der Winkel n gleich dem Winkel r. Hieraus folgt aber, daß bp gleich cp ist. Wenn nun b nicht zu weit von a entfernt

Fig. 75.



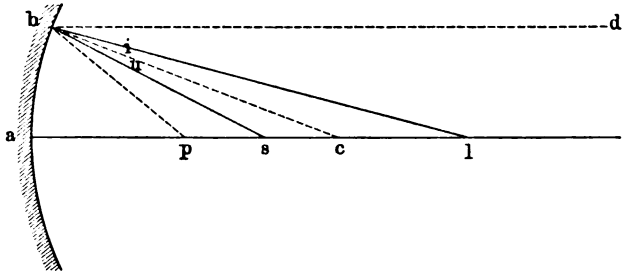
Brennpunkt des Hohlspiegels.

Digitized by Google

ist, so sind auch bp und ap nahezu gleich, und der Punkt p liegt daher in der Mitte zwischen dem Spiegel und dem Mittelpunkt c. Nach dem Punkt c werden daher alle Strahlen zurückgeworfen, die parallel mit lca ankommen. Da also in diesem Punkt viele Strahlen zusammenkommen, so können diese, wenn der leuchtende Körper die Sonne ist, hier eine hohe Hitze erzeugen und brennbare Gegenstände entzünden. Der Punkt p heißt daher der **Brennpunkt**. Die Entfernung dieses Punktes vom Spiegel ist die **Brennweite**. Wenn jedoch das Zusammentreffen der Strahlen im Punkt p genau sein soll, so darf der Spiegel kein allzu großer Teil einer Kugelfläche sein, da sonst bp und pc nicht mehr halb so lang als ac sind.

Befindet sich der leuchtende Punkt nicht in sehr großer Entfernung, sondern z. B. in l (Fig. 76), so kann man wieder einen Strahl durch den

Fig. 76.



Reflexion am Hohlspiegel.

Mittelpunkt c des Spiegels nach a ziehen, von wo er in derselben Richtung zurückkommt. Ein solcher Strahl wird der zentrale Strahl genannt. Die Linie la wird auch als Achse des Spiegels bezeichnet. Ein anderer Strahl lb wird in der Richtung bs zurückgeworfen. Da nun lb näher an cb liegt als db, so liegt auch der zurückgeworfene Strahl bs an bc näher als bp. Der Punkt s, in dem die Strahlen zusammenlaufen, liegt jetzt näher beim Mittelpunkt c als der Brennpunkt.

Durch ähnliche Betrachtungen findet man die Lage des Sammlungspunktes, wenn der leuchtende Punkt aus dem Unendlichen nach und nach bis an den Spiegel heranrückt (Fig. 77).

1. Leuchtender Punkt unendlich entfernt; Sammlungspunkt im Brennpunkt.

2. Leuchtender Punkt dem Spiegel näher, aber weiter entfernt als der Mittelpunkt; Sammlungspunkt zwischen Brennpunkt und Mittelpunkt.

3. Leuchtender Punkt im Mittelpunkt; Sammlungspunkt ebenfalls im Mittelpunkt.

4. Leuchtender Punkt zwischen Mittelpunkt und Brennpunkt; Sammlungspunkt weiter entfernt als der Mittelpunkt.

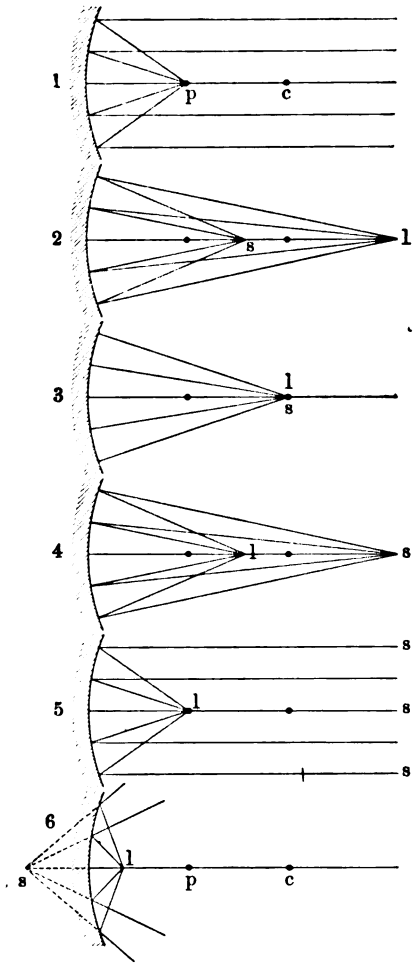
5. Leuchtender Punkt im Brennpunkt; Sammlungspunkt unendlich entfernt.

Digitized by Google

6. Leuchtender Punkt dem Spiegel näher als der Brennpunkt. Die Strahlen kommen vom Spiegel zurück, als ob sie vom Punkt s' hinter dem Spiegel herkämen.

Die Lage des Sammlungspunktes s für Lichtstrahlen, die von einem leuchtenden Punkt l ausgehen, erhält man durch Zeichnung in folgender Weise (Fig. 78, a. f. S.). Man zeichnet zuerst den zentralen Strahl la, der vom Spiegel in der Richtung al zurückkommt. Um zu finden, in welcher Richtung ein anderer Strahl, z. B. lb, zurückgeworfen wird, zieht man cb' parallel zu lb. Die Mitte p' dieser Linie ist dann der Brennpunkt für Strahlen von der Richtung lb und cb'. Der Strahl lb kommt also in der Richtung bp' vom Spiegel zurück und trifft den zentralen Strahl in s. In diesem Punkt treffen also die Strahlen la und lb nach der Zurückwerfung zusammen. Er ist daher der Sammlungspunkt für die Strahlen, welche von l ausgehen [1]).

Fig. 77.



Wirkung des Hohlspiegels.

§ 91. Wie der Hohlspiegel von einem Gegenstande Bilder erzeugt, ist nun leicht zu verstehen. Das Bild ist wesentlich verschieden, je

[1]) Durch Rechnung findet man den Sammlungspunkt in folgender Weise. Der Radius ac (Fig. 76) des Hohlspiegels sei r, die Entfernung la des leuchtenden Punktes sei l und die Entfernung pa des Brennpunktes p. Im Dreieck lbs halbiert die Linie bc den Winkel b, folglich gilt die Proportion:

$$bl : bs = cl : cs.$$

Nun ist bl nahezu gleich $al = l$, und bs ist ungefähr gleich $as = s$, also:

$$l : s = l - r : r - s.$$

Diese Gleichung läßt sich leicht so umgestalten, daß sie die Form:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{l} = \frac{1}{p}$$

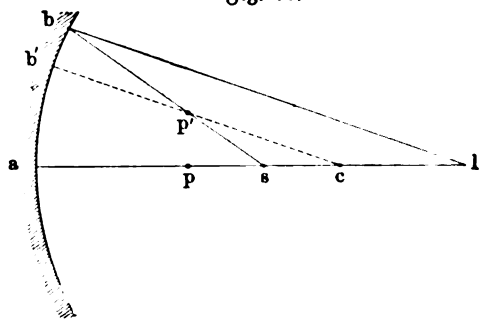
annimmt. Wenn also zwei von den drei Größen s, l und p gegeben sind, so findet man vermittelst dieser Gleichung leicht die dritte.

Digitized by Google

nachdem sich der Gegenstand außerhalb (Fig. 77, 1 bis 4) oder innerhalb (Fig. 77, 6) der Brennweite befindet.

Ist ab der Gegenstand (Fig. 79), so geht ein Strahl durch den Mittelpunkt c nach dem Spiegel hin und zurück, und alle anderen von a ausgehenden Strahlen, die den Spiegel treffen, laufen in einem Punkt α des zentralen Strahles zusammen. Ebenso laufen alle von b ausgehenden Strahlen in einem Punkt β im zentralen Strahl bc zusammen, dem einzigen von diesen Strahlen, der in der Figur gezeichnet ist. Die Strahlen von einem näheren Punkt d laufen in einem Punkt des zentralen Strahles dc zusammen, allein dieser Punkt liegt dem Mittelpunkt näher als die Punkte α und β.

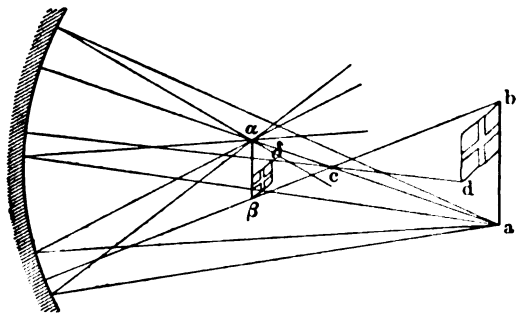
Fig. 78.



Konstruktion des Sammlungspunktes.

So entsteht ein im Raum frei schwebendes umgekehrtes Bild. Wenn der Gegenstand weiter, das Bild also weniger weit entfernt ist als das Zentrum, so ist das Bild verkleinert, im entgegengesetzten Falle dagegen vergrößert. Ferner ist es nicht wie das Bild im ebenen Spiegel ein scheinbares, sondern ein **wirkliches Bild**. Die das Bild erzeugenden Strahlen kommen wirklich an der betreffenden Stelle zusammen. Man kann das Bild auf einem Blatt Papier auffangen, welches man an die Stelle hält, wo das Bild entsteht. Wenn die Strahlen hier nicht aufgefangen werden, so kreuzen sie sich und gehen weiter, und wenn sie dann in ein Auge eintreten, so bekommt dieses den Eindruck, als ob sie von einem Gegenstande $\alpha\beta\delta$ herkämen. Sie kommen auch in Wirklichkeit von dieser Stelle her, aber nicht von einem Gegenstande, der sich hier befindet.

Fig. 79.



Entstehung des Bildes beim Hohlspiegel.

Ein derartiges Bild kann unter Umständen sehr täuschend sein. Ist der Gegenstand z. B. ein Blumenstrauß B (Fig. 80), den der Beobachter nicht direkt sehen kann, so kann bei geschickter Anordnung des Versuches die Täuschung eine so vollständige sein, daß sich der Beobachter versucht fühlt, an dem Bilde B_1 zu riechen.

Kein Wunder, daß es den unwissenden Zeitgenossen Roger Bacons

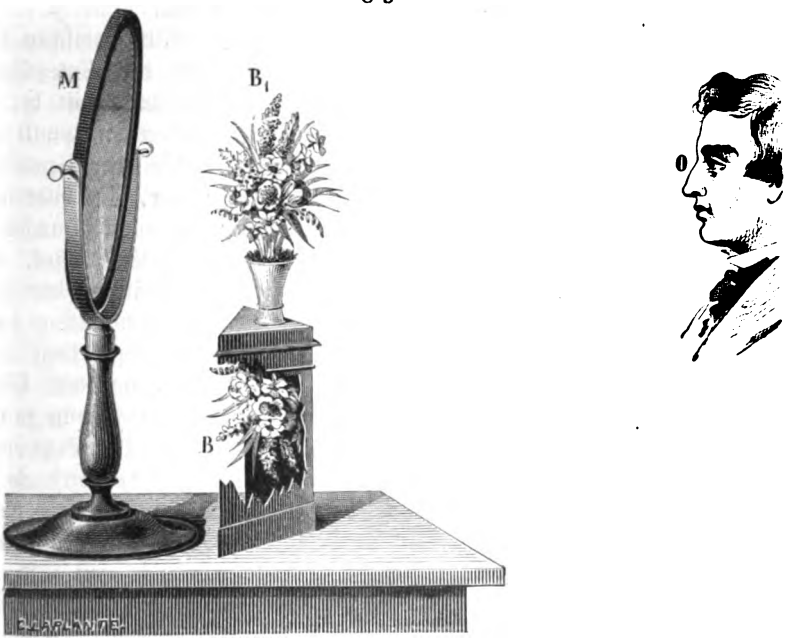
Digitized by Google

Ernst damit war, wenn sie diesen der Zauberei beschuldigten, da sie in der Luft deutlich Gegenstände sahen, die doch nicht da waren.

Da die Lichtstrahlen denselben Weg in der einen oder der entgegengesetzten Richtung zurücklegen, so bezeichnet in Fig. 79 abd ein wirkliches Bild des Gegenstandes $\alpha\beta\delta$.

Ist der Gegenstand weiter als das Zentrum entfernt, so ist das Bild näher als das Zentrum und verkleinert. Ist der Gegenstand näher als das

Fig. 80.



Täuschung durch ein „wirkliches Bild".

Zentrum, so ist das Bild weiter entfernt als das Zentrum und vergrößert. Befindet sich der Gegenstand im Zentrum, so hat das Bild dieselbe Entfernung und dieselbe Größe wie der Gegenstand. In allen diesen Fällen ist das Bild ein wirkliches und umgekehrtes.

Ist dagegen der Gegenstand AB (Fig. 81, a. f. S.) dem Spiegel näher als der Brennpunkt, so kommt der zentrale Strahl in unveränderter Richtung vom Spiegel zurück, und alle anderen von A ausgehenden Strahlen, die den Spiegel treffen, werden so zurückgeworfen, als ob sie von einem Punkt a des zentralen Strahles herkämen. Ebenso werden die von B ausgehenden Strahlen so zurückgeworfen, als ob sie vom Punkt b des zentralen Strahles herkämen. Das Auge F bekommt also von den zurückgeworfenen Strahlen den Eindruck, als ob sie von ab herkämen, wo sie doch überhaupt nicht gewesen sind. Es entsteht also ein scheinbares vergrößertes Bild des Gegen-

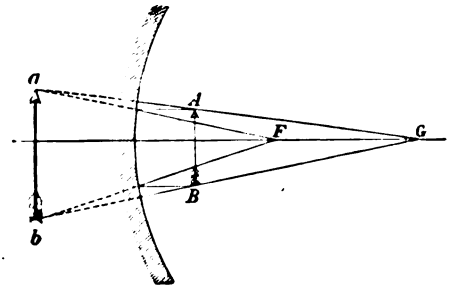
534373

Digitized by Google

standes hinter dem Spiegel, welches vom Spiegel weiter entfernt ist als der Gegenstand.

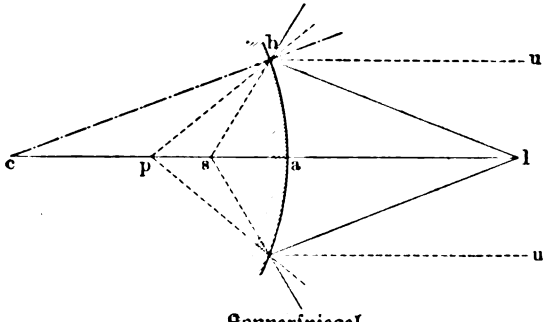
§ 92. Bei den Konvexspiegeln ist die vom Zentrum abgewendete Seite die spiegelnde. In ähnlicher Weise wie beim Hohlspiegel kann man sich davon überzeugen, daß parallele (aus unendlicher Entfernung kommende) Strahlen *u u* (Fig. 82) vom Spiegel so zurückgeworfen werden, als ob sie vom Punkt *p* kämen, der in der Mitte zwischen dem Zentrum und der Spiegelfläche liegt. Dieser Punkt ist der sogenannte Zerstreuungspunkt des Spiegels. Ist der leuchtende Punkt *l* näher, so bildet der ankommende, folglich auch der zurückgeworfene Strahl einen größeren Winkel mit dem Einfallslot, und der letztere kommt scheinbar von einem Punkt her, der zwischen dem Zerstreuungspunkt *p* und dem Spiegel liegt. Die Entstehung des Bildes ist hiernach leicht zu verstehen. Das Licht von *a* (Fig. 83) wird so zurückgeworfen, als ob es vom Punkt α käme, und das Licht von *b* so, als ob es von β käme, u. s. w. Es entsteht also ein scheinbares verkleinertes Bild $\alpha\beta\delta$ zwischen dem Zerstreuungspunkt und dem Spiegel. Konvexspiegel (Kugelspiegel) stellt man bekanntlich zuweilen zur Zierde in Gärten auf.

Fig. 81.



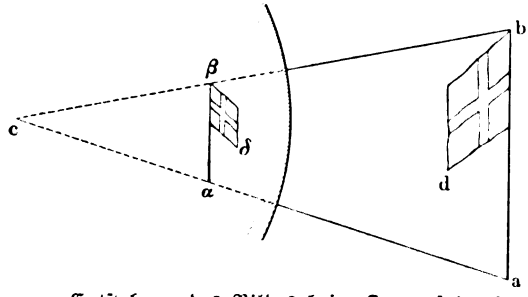
Der Hohlspiegel als Vergrößerungsspiegel.

Fig. 82.



Konvexspiegel.

Fig. 83.



Entstehung des Bildes beim Konvexspiegel.

§ 93. Auf silbernen Gegenständen u. dergl. findet man oft blanke Flächen, die keine Kugelflächen sind und die daher verzerrte Bilder erzeugen. Ist die Fläche konvex, so ist das Bild verkleinert, ist sie in einer Richtung gerade, so hat das Bild in dieser Rich-

Digitized by Google

tung dieselbe Größe wie der Gegenstand, ist sie konkav und der Gegenstand nahe genug, so ist das Bild vergrößert. Wenn nun die Fläche in einer Richtung, z. B. in der Richtung der Höhe, stärker gekrümmt ist als in einer anderen, z. B. in horizontaler Richtung, so werden die Bilder in der Richtung der Höhe stärker verkleinert als in der Richtung der Breite. Betrachtet man sich in einem solchen Spiegel, so erscheint das Gesicht in die Breite gezogen. Betrachtet man sich dagegen in einem Spiegel von der Form eines vertikalen Zylinders, so erscheint das Gesicht in die Länge gezogen.

Ebenso wie solche Spiegel von normalen Gegenständen verzerrte Bilder hervorbringen können, können sie auch normale Bilder von verzerrten Zeichnungen hervorbringen (Anamorphosen).

§ 94. Wenn Licht durch eine Glasperle hindurchdringt, so erleidet es eine eigentümliche Veränderung, die ohne Zweifel so lange bekannt gewesen ist, als man Glasperlen kannte, also seit den Zeiten der Phönicier. Im allgemeinen sieht man einen Gegenstand durch eine Glasperle hindurch vergrößert.

Eine Angabe hierüber findet sich bei Seneca (12 bis 66 n. Chr.), der von der „Vergrößerungskraft" einer mit Wasser gefüllten Flasche spricht. Eine einfache Vergrößerungsvorrichtung, die man ohne Schwierigkeit in Feld und Wald benutzen kann, erhält man dadurch, daß man in ein Blatt eine kleine Öffnung sticht und in diese ein Wassertröpfchen bringt. Dieses wirkt wie eine Glasperle.

Ebenso hat man seit sehr alten Zeiten gewußt, daß man durch die Sonnenstrahlen Feuer entzünden kann, wenn man sie durch eine Glaskugel oder durch eine mit Wasser gefüllte Flasche gehen läßt.

In den „Wolken" des Aristophanes sagt Strepsiades zu Sokrates, er wisse, wie er seine Gläubiger los werden könne. Wenn sie ihm die Rechnung präsentierten, so halte er sie unbemerkt in die Sonne und lasse sie durch das Glas, mit dem man Feuer anzündet, schmelzen.

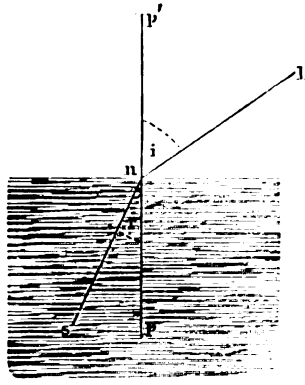
Plinius (23 bis 79 n. Chr.) schreibt, daß Glaskugeln im Sonnenschein zünden und Wunden brennen können, und Lactantius (gestorben 325), der Lehrer des Sohnes Konstantin des Großen, schreibt, eine mit Wasser gefüllte Glaskugel könne Feuer entzünden, obwohl das Wasser kalt bleibe. Mit Rücksicht auf die letztere Bemerkung kann hinzugefügt werden, daß eine Kugel oder Linse von Eis dieselbe Wirkung hervorbringen kann, ohne zu schmelzen. Man hat Beispiele, daß durch eine am Fenster stehende Wasserflasche die Gardinen in Brand gesetzt worden sind.

Von der Natur dieser Vorgänge hatte man jedoch, wie es scheint, im Altertum nur sehr geringe Kenntnis. Den ersten Beitrag in dieser Hinsicht lieferte Kleomedes, welcher fand (§ 53), daß ein Lichtstrahl, der aus einem dünneren Stoff in einen dichteren übergeht, so gebrochen wird, daß die neue Richtung der Senkrechten näher kommt, und daß das Licht denselben Weg beim umgekehrten Übergang nimmt, daß es sich also in diesem Falle von der Senkrechten entfernt. Ist oben der dünnere

Digitized by Google

und unten der dichtere Stoff, so ist der Weg des Strahles lns (Fig. 84), einerlei ob der Strahl von oben nach unten oder von unten nach oben geht. Der Winkel, den der Strahl mit der Senkrechten auf die Grenzfläche (Einfallslot) bildet, ist also im dichteren Mittel kleiner als im dünneren. Ptolemäus, der bei seinen Höhenmessungen die atmosphärische Strahlenbrechung berücksichtigte, machte Versuche, um die Stärke der Lichtbrechung beim Übergang aus Luft in Wasser, aus Luft in Glas und aus Wasser in Glas zu ermitteln. Dies ist eins der sehr seltenen Beispiele, daß man sich im Altertum nicht mit Beobachtungen begnügte, sondern Versuche anstellte. Ptolemäus fand, daß beim Übergang von Luft in Wasser der Brechungswinkel b gleich dem 0,76fachen des Einfallswinkels i ist. Für den Übergang aus Luft in Glas fand er $b = 0{,}67\,i$, und für den Übergang aus Wasser in Glas $b = 0{,}88\,i$.

Fig. 84.



Brechung des Lichtes.

Ein Lichtstrahl, der aus Luft in Glas übergeht und dabei so gebrochen wird, daß $b = 0{,}67\,i$ ist, wird gerade so stark abgelenkt, wenn er aus Luft erst in Wasser eintritt und aus diesem in das Glas übergeht. Denn wenn der Winkel zuerst im Verhältnis 0,76 vermindert und der neue Winkel im Verhältnis 0,88 vermindert wird, so wird der Winkel im Verhältnis $0{,}76 \times 0{,}88$ vermindert, was fast genau gleich 0,67 ist.

Ein arabischer Physiker Alhazen, der im 11. Jahrhundert in Spanien lebte und der über Optik geschrieben hat, stützt sich im wesentlichen auf Ptolemäus, hat aber doch einzelne neue Betrachtungen. So bemerkt er, daß das Verhältnis zwischen dem Einfallswinkel und dem Brechungswinkel bei verschiedener Richtung des Strahles etwas verschieden ist, daß also das Gesetz für die Größe der Brechung nicht so einfach ist, wie Ptolemäus angenommen hatte. Es vergingen jedoch noch mehrere Jahrhunderte, bis das Gesetz aufgefunden wurde.

§ 95. Inzwischen setzten die Araber und die Europäer ihre Beschäftigung mit Glaskugeln und Glaslinsen fort, mit denen sie merkwürdige Bilder hervorbringen konnten, die in der damaligen mystisch veranlagten Zeit großes Interesse erregten. Einige suchten, gestützt auf das, was man durch Kleomedes und Ptolemäus über die Brechung des Lichtes wußte, die Entstehung der Bilder mathematisch zu erklären, während andere durch Versuche mit den Gläsern selbst die Eigenschaften der Bilder zu finden suchten.

In letzterer Hinsicht zeichnete sich namentlich in dieser Übergangszeit Franciscus Maurolykos in Messina (1494 bis 1575) aus. Er war der Sohn eines aus Konstantinopel geflüchteten Griechen (§ 60). Obwohl er dem geistlichen Stande angehörte, beschäftigte er sich viel mit anderen Dingen,

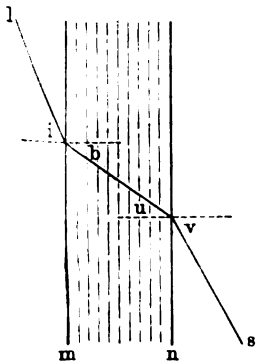
Digitized by Google

ward Direktor der Münze und stand in hohem Ansehen bei gelehrten und hochgestellten Personen. Er schrieb ein großes mathematisches Werk, in dem er alles Wichtige zusammenfaßte, was er sich aus älteren und neueren Werken angeeignet hatte. Ebenso schrieb er eine Optik, die manches Neue enthielt, z. B. eine Erklärung dafür, daß die eckigen Lücken in einem Laubdach ein rundes Sonnenbild geben. Auch war er wahrscheinlich der erste, der beobachtete, daß die Bilder der verfinsterten Sonne ebenfalls verfinstert sind (§ 81).

Er suchte auch die Entstehung der durch Kugeln und Linsen erzeugten Bilder mathematisch zu erklären.

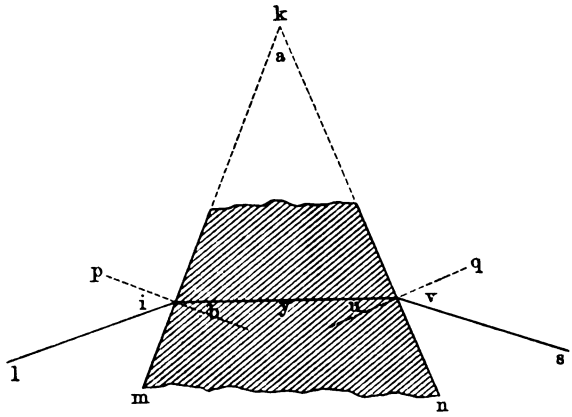
§ 96. Geht ein Lichtstrahl durch ein Glas mit parallelen Flächen, so erleidet es beim Eintritt eine Brechung, aber eine ebenso große in entgegen-

Fig. 85.



Weg eines Lichtstrahles durch eine Glasplatte.

Fig 86.



Weg eines Lichtstrahls durch ein Prisma.

gesetzter Richtung beim Austritt, so daß der austretende Strahl dieselbe Richtung hat wie der eintretende (Fig. 85), nur ist der letztere gegen den ersteren etwas verschoben, und zwar um so mehr, je schiefer der Strahl eintritt.

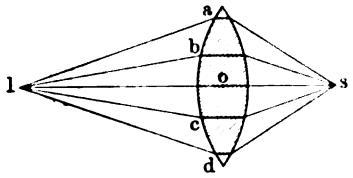
§ 97. Sind dagegen die Flächen *m* und *n*, durch welche die Strahlen ein- und austreten, nicht parallel, sondern bilden sie ein Stück von einem sogenannten Prisma (Fig. 86), dessen Kante *k* sein würde, so nähert sich der Strahl beim Eintritt dem Einfallslot *p* und entfernt sich beim Austritt vom Einfallslot *q*, tritt also in der Richtung *ps* aus. Wenn also ein Lichtstrahl durch ein Stück Glas geht, welches von zwei nicht parallelen Flächen — Prismenflächen — begrenzt wird, so entfernt sich der Strahl von der brechenden Kante des Prismas.

§ 98. Wenn Lichtstrahlen durch eine von Kugelflächen begrenzte Linse hindurchgehen, die in der Mitte dicker ist als am Rande, so behält derjenige Strahl, der durch die Mitte der Linse geht, seine Richtung bei, da die Flächenstücke, durch die der Strahl eintritt und austritt, parallel sind (Fig. 87).

Digitized by Google

Dagegen gehen die übrigen Strahlen, wie *la* und *lb*, durch Flächenstücke, die gegeneinander geneigt sind. Sie entfernen sich daher von der „brechenden Kante des Prismas“ und treffen mit dem ersten Strahl im Punkt *s* zusammen. Auch die den unteren Teil der Linse durchlaufenden Strahlen, wie *lc* und *ld*, treffen mit den übrigen im Punkt *s* zusammen.

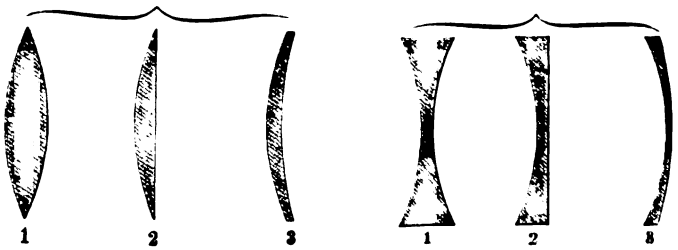
Fig. 87.



Sammellinse.

Eine ähnliche Wirkung üben alle Linsen aus, die in der Mitte dicker sind als am Rande (Fig. 88). Die Strahlen werden durch diese Linsen in einem Punkt vereinigt oder wenigstens schwächer divergierend gemacht. Derartige Linsen sind Sammellinsen. Die Stärke ihrer Wirkung hängt sowohl von der Form, als auch von der Natur des Stoffes ab, aus dem sie bestehen. Selbst verschiedene Glassorten sind in ihrer

Fig. 88.



Sammellinsen und Zerstreuungslinsen.

Wirkung verschieden. Man kommt bei ihnen durchaus nicht, wie Ptolemäus glaubte, mit einer einzigen Zahl aus.

Kommt das Licht aus unendlicher Entfernung (Fig. 89, 1), so wird es in einem Punkt *s*, dem sogenannten Brennpunkt der Linse, gesammelt. Die Entfernung dieses Punktes von der Linse ist die Brennweite. Die Figuren, in denen die einfache und die doppelte Brennweite durch Punkte bezeichnet sind, veranschaulichen die folgenden verschiedenen Fälle:

1. Wenn *l* unendlich entfernt ist, so ist *s* in der Brennweite.
2. Wenn *l* in endlicher Entfernung, aber außerhalb der doppelten Brennweite ist, so ist *s* zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite.
3. Wenn *l* in der doppelten Brennweite ist, so ist *s* ebenfalls in der doppelten Brennweite.
4. Wenn *l* zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite ist, so ist *s* außerhalb der doppelten Brennweite.
5. Wenn *l* in der Brennweite ist, so ist *s* unendlich entfernt.
6. Wenn *l* innerhalb der Brennweite ist, so werden die Strahlen überhaupt nicht gesammelt, sondern sie treten aus der Linse so aus, als ob sie

Digitized by Google

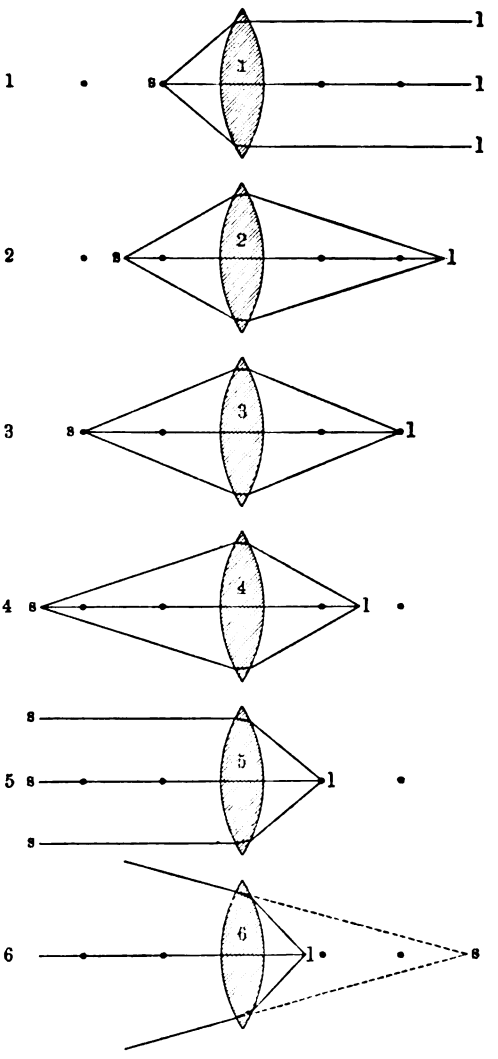
von einem Punkt s' herkämen, der auf derselben Seite der Linse liegt wie der leuchtende Punkt selbst, aber weiter entfernt von der Linse, als diese [1]).

§. 99. Da die Sammellinse auf das Licht dieselbe Wirkung ausübt wie der Hohlspiegel, erzeugt sie auch in ähnlicher Weise wie dieser Bilder der Gegenstände, von denen das auf die Linse fallende Licht ausgeht (Fig. 90, a. f. S.).

Das vom Punkt a ausgehende Licht wird im Punkt α des zentralen Strahles gesammelt. Ebenso sammelt sich das von b und d ausgehende Licht in den Punkten β und δ. In der Figur sind nur zwei zentrale Strahlen gezeichnet. Es entsteht ein umgekehrtes Bild, welches kleiner, ebenso groß oder größer als der Gegenstand ist, je nachdem sich dieser außerhalb der doppelten Brennweite, in der doppelten Brennweite oder innerhalb der doppelten Brennweite befindet.

Die Bilder sind wirkliche. Die Strahlen laufen in einem Punkt zusammen und können daher auf einem Schirm ein Bild hervorbringen. Gehen sie weiter und treten in ein Auge ein, so bekommt dieses den Eindruck, als ob sie von einem Gegenstand $\alpha\beta\delta$ herkämen, der jedoch nicht existiert.

Fig. 89.



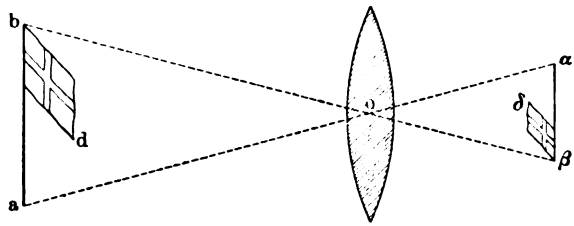
Wirkung der Sammellinse.

[1]) Wenn man die Brennweite einer Sammellinse kennt, so findet man den Sammlungspunkt ähnlich wie beim Hohlspiegel entweder durch Zeichnung oder vermittelst der Formel $\frac{1}{l} + \frac{1}{s} = \frac{1}{p}$. Welches ist z. B. die Entfernung des Sammelpunktes, wenn die Brennweite 12 cm und die Entfernung des leuchtenden Punktes 30 cm ist?

Digitized by Google

Wird der Schirm links von $\alpha\beta\delta$ angebracht, so ist das Licht der einzelnen Punkte noch nicht vollständig gesammelt. Wird er rechts von $\alpha\beta\delta$ angebracht, so beginnen die Strahlen bereits wieder auseinanderzulaufen. In beiden Fällen ist das Bild nicht scharf.

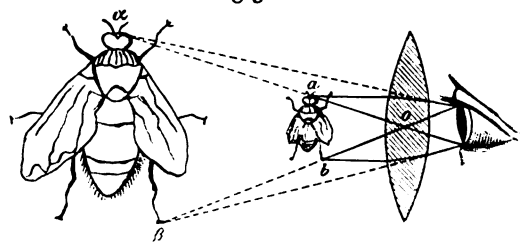
Fig. 90.



Entstehung der Bilder bei der Sammellinse.

§ 100. Befindet sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite, so werden die aus der Linse austretenden Strahlen nicht gesammelt, sondern sie treten so aus der Linse aus, als ob sie von einem Punkt kämen, der von der Linse weiter entfernt ist als der Gegenstand (Fig. 89, 6). Das aus der

Fig. 91.

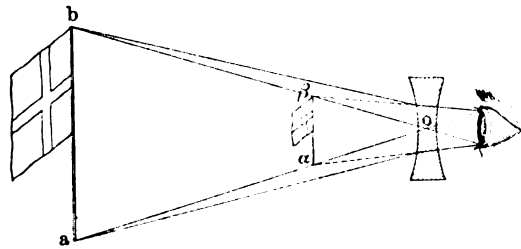


Die Sammellinse als Vergrößerungsglas.

Linse austretende Licht wird also in einem Auge den Eindruck hervorbringen, als ob es von $\alpha\beta$ (Fig. 91) herkäme. Die Linse wirkt also als Vergrößerungsglas oder Lupe (vergl. § 94).

§ 101. Linsen, die in der Mitte dünner sind als am Rande (Fig. 88, 3), zerstreuen offenbar die Strahlen, welche von einem einzelnen Punkt a (Fig. 92)

Fig. 92.



Zerstreuungslinsen als Verkleinerungsglas.

Digitized by Google

herkommen. Denn während der zentrale Strahl ungebrochen hindurchgeht, treffen die Strahlen im unteren Teil der Linse Flächenteile, deren brechende Kante nach oben liegt. Diese Strahlen werden also nach unten abgelenkt. Ebenso werden die Strahlen, welche den oberen Teil der Linse treffen, nach oben abgelenkt. Die Strahlen treten also aus der Linse aus, als ob sie vom Punkt α kämen. Ebenso treten die von b kommenden Strahlen so aus, als ob sie von β kämen. Die Zerstreuungslinse bewirkt also, daß das Auge ein verkleinertes scheinbares Bild $\alpha\beta$ des Gegenstandes sieht.

§ 102. Ein Zeitgenosse des Maurolykos, Giambattista della Porta, erregte großes Aufsehen durch die merkwürdigen Erscheinungen, die er mit solchen Linsen hervorbrachte.

Porta war 1538 in Neapel geboren und starb 1615. Er war eine feurige Natur mit einem großen Hang zum Mystischen. Er soll 24 Dramen verfaßt haben, und im Alter von 15 Jahren schrieb er eine „natürliche Magie", die vier Bände umfaßte und von den verschiedensten natürlichen und übernatürlichen Dingen handelte. Das Werk erschien in verschiedenen Auflagen und wurde ins Italienische, Spanische, Französische, Deutsche und Arabische übersetzt. Später erschien eine erweiterte Ausgabe des Buches in 20 Bänden, die jedoch nicht einen solchen Absatz fand wie die älteren Auflagen.

Porta hat außerdem das Verdienst, die erste wissenschaftliche Akademie in Italien gestiftet zu haben. Um jene Zeit entstanden in Italien eine Menge gelehrter Gesellschaften, die sich nach der von Plato gestifteten Schule Akademie nannten. In Portas Akademie galt die Bestimmung, daß niemand Mitglied werden konnte, ohne etwas Neues geleistet oder entdeckt zu haben. Dieser Akademie war jedoch kein langes Leben beschieden.

Ein Franzose, mit dem sich Porta verfeindet hatte, klagte ihn wegen einer von ihm verfertigten Hexensalbe an, und da man in jener Zeit auf seiten der Kirche den Naturwissenschaften gegenüber mit Rücksicht auf Glaubensangelegenheiten sehr empfindlich war, da Porta sich außerdem mit anderen merkwürdigen Dingen beschäftigte, so hätte diese Anklage für ihn gefährlich werden können, wenn er es nicht durch eine Reise nach Rom erreicht hätte, daß von weiteren Anklagen abgesehen wurde. Seine Akademie wurde jedoch aufgelöst.

Porta beschreibt unter anderem eine Dunkelkammer, die mit einer Sammellinse versehen ist, und zwar scheint diese wichtige Verbesserung von ihm selbst herzurühren. Anstatt sich mit einer kleinen Öffnung in der Wand eines Kastens oder eines Zimmers zu begnügen, bringt man eine Sammellinse mn (Fig. 93, a. f. S.) so an, daß sie an der gegenüberliegenden Wand oder auf einem Schirm ein scharfes Bild der äußeren Gegenstände erzeugt. Jetzt erzeugt alles Licht, welches von a ausgeht, nicht einen Fleck, sondern einen Punkt α, und indem so jeder Punkt des Gegenstandes durch einen Punkt im Bilde wiedergegeben wird, wird das Bild scharf. Das Bild wird aber

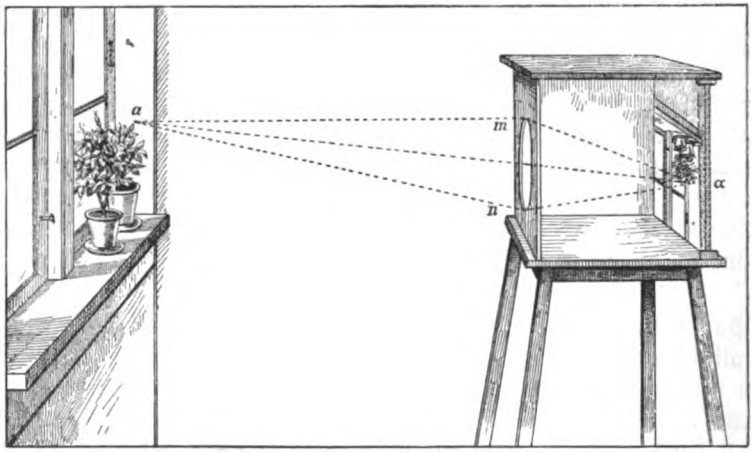
Digitized by Google

zugleich lichtstark, da jetzt von jedem Punkte ein großer Lichtkegel *man* in die Dunkelkammer eindringt.

Das Bild muß jedoch, wenn es scharf sein soll, an der richtigen Stelle aufgefangen werden. Diese hängt aber von der Entfernung des Gegenstandes ab. Je größer diese ist, desto näher an der Linse entsteht das Bild. Der Schirm kann daher nicht so angebracht werden, daß nahe und entfernte Gegenstände zugleich scharfe Bilder geben.

Eine solche Dunkelkammer wird heutzutage von den Photographen benutzt. Zunächst wird die Rückseite (eine mattgeschliffene Glasscheibe) so ein-

Fig. 93.



Dunkelkammer mit Linse.

gestellt, daß auf derselben ein scharfes Bild entsteht. Wenn eine Gruppe von Personen aufgenommen werden soll, so sucht man diese so gut wie möglich in gleicher Entfernung aufzustellen. Hat man ein scharfes Bild auf der Rückseite, so wird diese durch eine chemisch präparierte Platte ersetzt, auf die das Bild so einwirkt, daß man später durch gewisse chemische Prozesse auf der Platte ein Bild hervorrufen und fixieren kann.

Porta erzeugte Bilder nicht nur von Gegenständen, sondern auch von Glasmalereien. Dabei erfand er die Laterna magica. Bei dieser befindet sich im Gegensatz zur Dunkelkammer im Innern eines geschlossenen Raumes eine Lampe, und das Bild entsteht außerhalb dieses Raumes.

In Fig. 94 ist *m* die Linse (es sind gewöhnlich mehrere), *ab* eine Glasplatte mit einem durchsichtigen Gemälde. Da man in der Regel ein großes Bild *AB* zu erzeugen wünscht, ist es sehr wesentlich, daß *ab* sehr stark beleuchtet wird. Die Linse *L* und der Hohlspiegel *M* dienen dazu, das Licht der Lampe möglichst vollständig auf das Glasbild zu bringen.

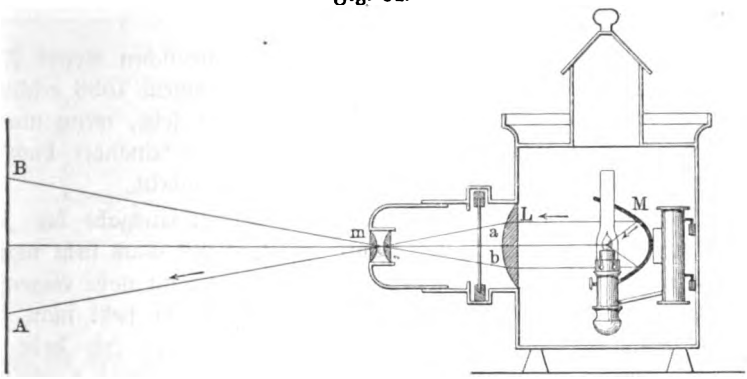
Taschenspieler führen zuweilen auf einem großen Vorhang derartige Bilder vor, die durch eine oder auch durch zwei Laternen hervorgebracht

Digitized by Google

werden, durch deren gleichzeitige oder abwechselnde Wirkung an derselben Stelle recht ergötzliche Dinge zuwege gebracht werden können.

Größere Bedeutung hat der Apparat in neuerer Zeit unter dem Namen Skioptikon erlangt. Es ist ein sorgfältiger konstruiertes Instrument, als es die Laterna magica gewöhnlich ist, und es ist dazu bestimmt, einem größeren

Fig. 94.



Laterna magica.

Zuschauerkreis Abbildungen von Kunstwerken, Bilder astronomischen und physikalischen Inhaltes, Landschaften u. s. w. vorzuführen. Glasphotographien für diesen Zweck hat man in großer Menge im Handel.

Wenn ein derartiges Instrument sehr sorgfältig ausgeführt ist, so daß die Bilder eine sehr starke Vergrößerung ertragen, ohne undeutlich zu werden, so kann es dazu dienen, mikroskopische Objekte vorzuführen. Hierzu ist eine sehr kräftige Beleuchtung erforderlich, die man durch Sonnenlicht, durch elektrisches Licht oder durch Knallgaslicht (Kalklicht) erzeugen kann.

§ 103. Während sich Theoretiker und Praktiker in der angegebenen Weise mit den durch Spiegel und Linsen erzeugten Bildern beschäftigten, kann es nicht ausgeblieben sein, daß man mehrere Spiegel oder Linsen zusammenstellte, um von einem Bilde wieder ein Bild zu erzeugen. Aus derartigen Zusammenstellungen sind nach und nach das Fernrohr und das Mikroskop hervorgegangen. Eine einzelne Person kann weder für das eine, noch für das andere dieser beiden Instrumente als Erfinder angegeben werden. Dies ist jedoch von untergeordneter Bedeutung, insofern man den Blick auf die Kenntnis der Gesetze des Lichtes selbst richtet, so große Dienste diese Instrumente auch im praktischen Leben und in der Wissenschaft geleistet haben.

Die Erfindung des Fernrohres geht bis in das Abenteuerliche zurück. Nach einer mohammedanischen Erzählung soll sich auf dem Leuchtturm von Alexandria ein großer Spiegel befunden haben, mit dem man die Schiffe von Griechenland absegeln sehen konnte. Wegen der Krümmung der Erde müßten diese doch eine ziemliche Strecke von Griechenland entfernt sein, wenn es möglich sein sollte, sie von dem genannten Leuchtturm aus zu sehen.

Digitized by Google

Wenn der Erzählung überhaupt etwas zu Grunde liegt, muß man wohl an eine Zusammenstellung eines großen Hohlspiegels mit Linsen denken. Etwas Ähnliches wird von einem großen Turm in Ragusa erzählt. Zuweilen wird Roger Bacon als Erfinder des Fernrohres genannt, allein aus seinem Werke ergibt sich höchstens, daß er die Möglichkeit der Zusammenstellung von Linsen und Spiegeln erkannt hat, aber er selbst hat wohl schwerlich eine derartige Vorrichtung gehabt.

Viel unzweideutiger ist ein Ausspruch eines italienischen Arztes Fracastoro in Verona (1483 bis 1553). Dieser sagt in einem 1538 erschienenen Werke, daß man Gegenstände viel größer und näher sehe, wenn man zwei Linsen übereinander anbringt. Wenn man dies „über"einander buchstäblich nimmt, dürfte es sich hier wohl um ein Mikroskop handeln.

Noch deutlicher schreibt Porta in seiner großen Ausgabe der „natürlichen Magie" vom Jahre 1589: „Durch ein konkaves Glas sieht man entfernte Gegenstände deutlich, durch ein konvexes sieht man nahe Gegenstände. Versteht man beide Arten richtig zusammenzustellen, so sieht man sowohl nahe als entfernte Gegenstände größer und deutlicher. Ich habe vielen Freunden, welche schlechte Augen hatten, einen großen Dienst erwiesen und sie in den Stand gesetzt, deutlich zu sehen." Während diese Worte kaum mißzuverstehen sind, ist es anderseits fast unbegreiflich, daß ein Mann wie Porta mit einer so wichtigen Erfindung bekannt gewesen sein soll, ohne sie ausführlich zu beschreiben und ohne von den Entdeckungen zu berichten, die er mit einem einigermaßen guten Fernrohre am Himmel hätte machen können. Das Fernrohr, welches Porta besaß, muß doch wohl sehr schwach vergrößert haben. Aber sein weit verbreitetes Buch hat möglicherweise dazu beigetragen, daß sich andere mit dem Gegenstande beschäftigten.

Man darf es wohl als die Frucht dieser Beschäftigung betrachten, wenn im Jahre 1608 die holländische Regierung fast gleichzeitig von verschiedenen Seiten um Bewilligung eines Patentes auf ein Fernrohr angegangen wurde. Daß die Regierung keinem der Bewerber ein Patent erteilen, aber einem derselben für ein gut gearbeitetes Instrument ein Honorar zahlen wollte, ist vielleicht der beste Beweis dafür, daß keiner der Bewerber als der eigentliche Erfinder angesehen wurde, und wenn zuweilen Lippershey oder Metius oder Janſen als Erfinder genannt wird, so ist dies wohl so zu verstehen, daß sie alle drei brauchbare Instrumente verfertigt hatten. Diese Leistungen verdienen übrigens alle Anerkennung, und die Bezeichnung des Fernrohres derjenigen Art, die damals zuerst in Holland verfertigt wurde, als holländisches Fernrohr ist durchaus gerechtfertigt.

Als man in Italien von diesen Instrumenten hörte, verfertigte Galilei ein Fernrohr derselben Art. Daher wird es auch als Galileisches Fernrohr bezeichnet.

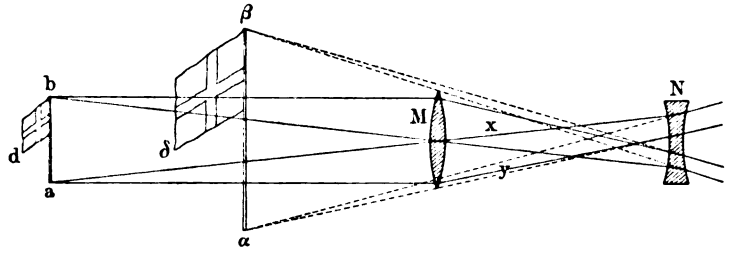
Ein solches besteht aus zwei Linsen, einer Sammellinse *M* (Fig. 95) und einer Zerstreuungslinse *N*. Die Sammellinse würde ein kleines Bild

Digitized by Google

des Gegenstandes *abd* erzeugen. Allein noch ehe dies Bild entsteht, treffen die Strahlen die Zerstreuungslinse *N*, die ihnen eine andere Richtung gibt.

So vereinigen sich die Strahlen *ax* und *ay* nicht, sondern sie werden durch die Linse nach oben (von der brechenden Kante hinweg) abgelenkt und zugleich zerstreut, so daß sie vom Punkt *α* herzukommen scheinen. Ebenso

Fig. 95.

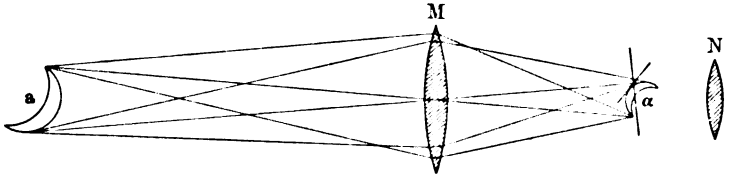


Das holländische oder Galileische Fernrohr.

bringen die von *b* und von *d* ausgehenden Strahlen im Auge den Eindruck hervor, als ob sie von *β* und von *δ* herkämen. Man sieht also den Gegenstand näher und vergrößert. Die Linsen werden in einem Rohre angebracht, um fremdes Licht abzuhalten. Die Länge des Rohres kann verändert und also der Entfernung des Gegenstandes sowie der Beschaffenheit des Auges angepaßt werden. Daß dies notwendig ist, wurde bereits 1610 von Kepler erkannt.

§ 104. Im Jahre 1611 gab Kepler eine Optik heraus, in welcher er verschiedene andere Fernrohre vorschlägt. Der wichtigste von diesen Vor-

Fig. 96.



Das Keplersche oder astronomische Fernrohr.

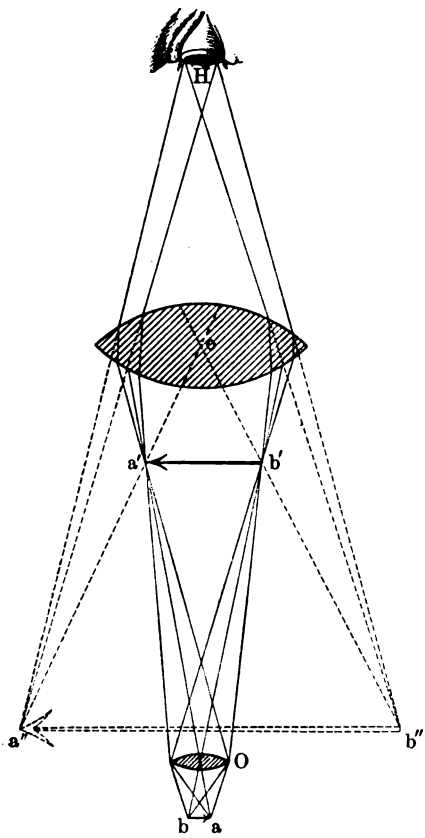
schlägen wurde einige Jahre später von seinem Landsmann Scheiner (1575 bis 1650), einem gelehrten Jesuitenmönch, zur Ausführung gebracht. Dieses Fernrohr ist das Keplersche oder astronomische. Es besteht aus zwei konvexen Linsen (Fig. 96). Die eine derselben, *M*, erzeugt ein wirkliches Bild *α* des Gegenstandes *a*. Dieses wird durch eine andere stark konvexe Linse *N* betrachtet, die als einfaches Vergrößerungsglas wirkt.

Das Bild ist natürlich umgekehrt. Daher eignet sich dieses Fernrohr nicht zum Betrachten irdischer Gegenstände. Dagegen hat es andere Vorzüge vor dem holländischen Fernrohr. Man kann z. B. an der Stelle, wo das

Digitized by Google

Bild entsteht, ein Fadenkreuz anbringen, welches man durch N zugleich mit dem Bilde erblickt, und vermittelst dessen man das Fernrohr sehr genau auf einen Gegenstand einstellen kann. Man kann auch an derselben Stelle im Fernrohr feine Fäden anbringen, die vermittelst einer Schraube verschoben werden können. Man kann dann die Fäden so einstellen, daß sie bestimmte Punkte des Bildes, z. B. den Sonnenrand, berühren, und dann an der Schraube die Größe des Bildes ablesen. Diese außerordentlich wertvolle Eigenschaft des Keplerschen Fernrohres, die das holländische Fernrohr nicht besitzt, wurde jedoch erst 30 bis 40 Jahre später erkannt.

Fig. 97.



Erklärung des Mikroskops.

Eine andere Form des Fernrohres wurde 1645 vom Kapuzinermönch Schyrl in Böhmen angegeben. Es besteht aus vier Konvexlinsen, von denen die beiden mittleren das (umgekehrte) Bild umkehren. Man sieht also durch dieses Fernrohr die Gegenstände aufrecht, weshalb es terrestrisches Fernrohr genannt wird. Schyrl war der erste, der die dem Gegenstand zugewendete Linse als Objektiv und die dem Auge zugewendete Linse als Okular bezeichnete.

§ 105. Daß eine Konvexlinse oder eine ganze Kugel als Vergrößerungsglas dienen kann, wurde bereits früher erwähnt (§ 94, 100). Wenn eine solche Linse in einer Fassung angebracht ist, wird sie Lupe, und wenn sie mit einem Stativ versehen ist, einfaches Mikroskop genannt. Das zusammengesetzte Mikroskop wurde gleichzeitig mit dem Fernrohr erfunden, und zwar haben sich um die Konstruktion desselben ebenfalls die Holländer, namentlich Jensen, verdient gemacht.

Eine kleine, sehr stark konvexe Linse (heute eine Zusammenstellung von mehreren) O erzeugt vom Gegenstand ab (Fig. 97) ein wirkliches Bild $a'b'$, und dieses wird durch die Linse o wie ein Gegenstand durch eine Lupe betrachtet. Man sieht das scheinbare Bild $a''b''$. Da das Bild viel größer als der Gegenstand ist, muß es kräftig beleuchtet werden, am besten durch Licht, welches von unten her in das auf einer Glasplatte liegende Präparat ein-

Digitized by Google

bringt. Das Auge muß sich an der in der Figur angedeuteten Stelle befinden, damit es alle aus der Okularlinse kommenden Strahlen aufnehmen kann. Das Ganze wird in einem Stativ angebracht, von dem Fig. 98 eine Ansicht gibt. Das Rohr ist gegen eine Öffnung in einem Tischchen gerichtet, welches die Glasplatte mit dem Präparat trägt und dem das Rohr vermittelst einer Schraube mehr oder weniger genähert werden kann. Ein Spiegel unter dem Tischchen, welches durch Drehung in jede beliebige Stellung gebracht werden kann, wirft das Licht einer Lampe oder das Tageslicht durch das Präparat in das Rohr. Undurchsichtige Gegenstände werden vermittelst einer Linse von oben her beleuchtet. Das Ganze kann je nach Bequemlichkeit in eine mehr oder weniger geneigte Lage gebracht werden.

Fig. 98.

Mikroskop.

§ 106. So konstruierte man eine Menge nützlicher Instrumente, die auf der Brechung des Lichtes beruhen, trotzdem das Gesetz für die Brechung des Lichtes noch nicht genau bekannt war. Alhazen hatte erkannt (§ 94), daß das von Ptolemäus ausgesprochene Gesetz nicht richtig war. Nach der Meinung des Ptolemäus sollte das Verhältnis zwischen Einfallswinkel und Brechungswinkel immer dasselbe, für Luft und Wasser z. B. 4:3 sein.

Ein begabter junger Holländer, Willibrord Snell oder Snellius, geb. 1591, Professor der Mathematik in Leiden (gest. 1626), fand endlich das Gesetz. Es wurde jedoch erst 1637 von Descartes veröffentlicht, und zwar ohne Angabe, wer es erfunden habe, so daß Descartes selbst oft als Entdecker des Gesetzes angesehen worden ist. Snellius hatte ein Buch über das Gesetz geschrieben, das jedoch nicht veröffentlicht wurde, und wahrscheinlich hat es Descartes während seines Aufenthaltes in Holland kennen gelernt. Das Gesetz läßt sich in folgender Weise aussprechen (Fig. 99, a. f. S.): Trägt man vom Punkt o, in welchem der Strahl die Grenzfläche passiert, auf beiden Teilen des Strahles die gleichen Stücke ol und os ab, zieht durch l und s Linien parallel zur Grenzfläche bis zur Senkrechten auf diese Fläche, so ist das Verhältnis dieser beiden Parallelen für je zwei Stoffe ein ganz bestimmtes (für Luft und Wasser z. B. 4:3), einerlei welchen Winkel der Strahl mit der Grenzfläche bildet [1]).

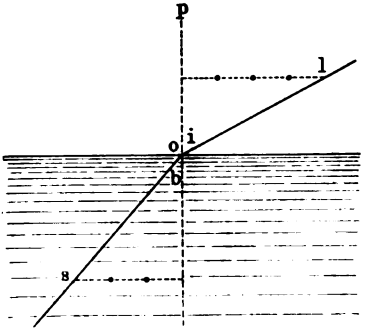
[1]) Der mathematische Ausdruck für das Gesetz ist sehr einfach. Wenn i der Einfallswinkel, b der Brechungswinkel und n das konstante Verhältnis ist, dann ist:

$$\frac{\sin i}{\sin b} = n.$$

Digitized by Google

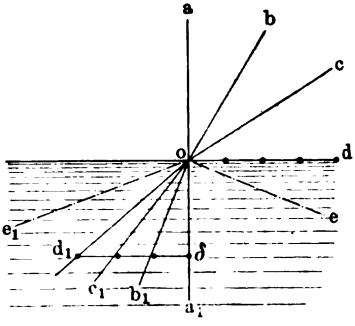
§ 107. Wenn nun der Strahl ao (Fig. 100) in der Richtung oa, der Strahl bo in der Richtung ob, der Strahl co in der Richtung oc und der horizontale Strahl do in der Richtung od_1 fortschreitet, so daß sich od oder od_1 zu $d_1\delta$ wie 4 zu 3 verhält, so legen diese Strahlen auch in der entgegengesetzten Richtung denselben Weg zurück. Der Strahl, welcher in der

Fig. 99.



Das Lichtbrechungsgesetz.

Fig. 100.



Vollständige Zurückwerfung.

Richtung d_1o an die Grenzfläche kommt, tritt also horizontal, d. h. in der Richtung der Oberfläche des Wassers aus. Kepler scheint der erste gewesen zu sein, der die Frage aufgeworfen und beantwortet hat, wie sich ein Strahl im Wasser verhält, der wie e_1o der Oberfläche noch näher liegt. Dieser kann nach dem Lichtbrechungsgesetz nicht in die Luft übergehen. Kepler[1]) fand, daß er von der Grenzfläche vollständig zurückgeworfen wird, und zwar nach dem allgemeinen Spiegelungsgesetz.

In ruhiges Wasser dringt daher alles Licht in Richtungen ein, die vom Einfallslot höchstens so weit entfernt sind wie od_1. In dieser Richtung sieht also ein Fisch den Horizont, der sich für ihn als ein Kreis in der Oberfläche des Wassers zeichnet. Weiter nach oben erblickt er — wie durch ein großes Fenster — Gegenstände, die sich höher in der Luft befinden, ebenso Gegenstände, die sich in dieser Richtung im Wasser befinden. Weiter abwärts, d. h. außerhalb des Kreises, bildet die Oberfläche des Wassers einen vollkommenen Spiegel, in dem sich alles spiegelt, was sich unter dem Wasser befindet (Fig. 101).

Wegen der vollständigen Zurückwerfung kann ein Lichtstrahl nicht durch ein Prisma hindurchgehen, dessen Seiten einen hinreichend großen Winkel miteinander bilden. Wenn z. B. die Linie ab (Fig. 102) mit den beiden Prismenflächen oa und ob einen so kleinen Winkel bildet, daß ein Lichtstrahl von dieser Richtung nicht austreten kann, sondern vollständig zurückgeworfen wird, so wird dies auch bei einem Strahl mn der Fall sein, der zwar in

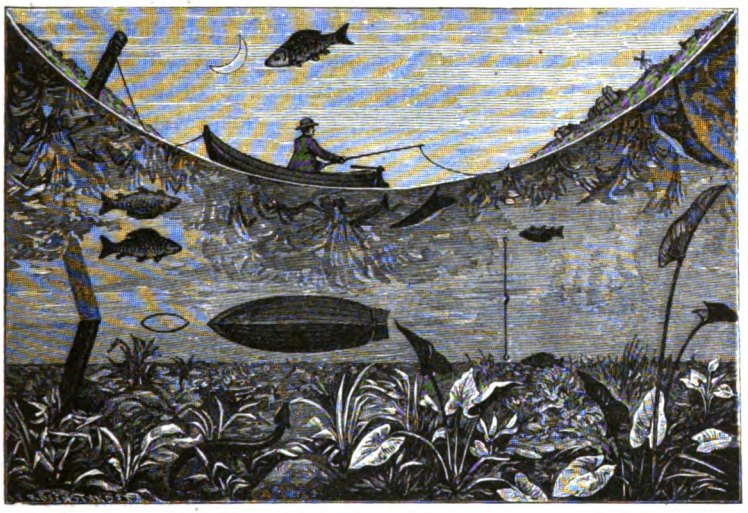
[1]) Zu Lebzeiten Keplers war das genaue Brechungsgesetz noch nicht bekannt.

Digitized by Google

der Richtung *nb* eintreten kann, aber im Punkt *b* eine vollständige Zurückwerfung erleidet.

§ 108. Von den Gesetzen des Lichtes kannte man, wie gesagt, bis in das 17. Jahrhundert nur zwei — das der geradlinigen Fortpflanzung und das der Spiegelung — und etwas von dem dritten, dem Brechungsgesetz,

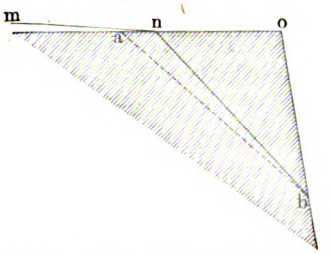
Fig. 101.



Eine Fischperspektive.

welches erst in dem genannten Jahrhundert vollständig erkannt wurde. Aber die Griechen und andere nach ihnen wußten diese wenigen Tatsachen gut zu verwerten. Auch die Natur des Auges wurde während dieses Zeitraumes nach und nach richtig erkannt.

Fig. 102.



Vollständige Zurückwerfung in einem Prisma.

Die Griechen wußten in dieser Hinsicht, wie es scheint, nichts. Aristoteles glaubt, es müsse eine gewisse Menge Luft zwischen dem Auge und dem Gegenstande sein, damit sich das Licht fortpflanzen könne, denn wenn der Gegenstand ganz dicht vor das Auge gehalten wird, so sieht man ihn nicht deutlich. Euklid meint, der Lichtstrahl, welcher bewirke, daß wir sehen, sei eine unendlich dünne (mathematische) Linie. Alhazen dagegen begnügt sich nicht mit der Spekulation, sondern zerschneidet ein Auge und beschreibt die verschiedenen Teile desselben. Er erkennt, daß von jedem Punkt des Gegenstandes nicht ein Strahl, sondern ein ganzes Strahlenbündel, ein Strahlenkegel das Auge treffen und durch die Pupille wie durch

Digitized by Google

ein Fenster in ein Zimmer eintreten muß. Dicht hinter der Pupille fand er die Kristalllinse, einen durchsichtigen, runden, etwas plattgedrückten Körper, und diesen hielt er für das eigentliche Sehorgan.

§ 109. Der erste, der ausgesprochen hat, daß das Auge eine Art Dunkelkammer ist, war Leonardo da Vinci. Er war 1452 in der Nähe von Florenz geboren. In seiner Jugend brachte er einige Jahre in Ägypten im Dienste des Sultans von Kairo zu, lebte später in Oberitalien, wo er sich als Maler, Bildhauer, Architekt, Musiker und Mathematiker auszeichnete. Er hat ein Werk über die Malerkunst geschrieben, bei dessen Abfassung ihm seine mathematischen und physikalischen Kenntnisse zu statten kamen. Er starb 1519 in Frankreich, wohin er drei Jahre zuvor von Franz I. berufen worden war.

Leonardo kannte nur die einfache Dunkelkammer (ohne Linse) und war daher nicht im stande, die Wirkung des Auges vollständig zu erklären.

Della Porta dagegen, der doch die vervollkommte Form der Dunkelkammer (mit Linse) kannte, scheint nicht wesentlich weiter gekommen zu sein als Alhazen, denn er betrachtet ebenso wie dieser die Kristalllinse für das Organ, auf welches das Licht wirkt.

Maurolykos weist der Kristalllinse die richtige Rolle an, indem er sagt, daß sie wie eine Glaslinse wirke, während die Empfindung des Sehens weiter hinten im Auge ihren Sitz habe. Wenn die Linse zu stark gekrümmt ist, so muß ihre Wirkung durch hohlgeschliffene Brillengläser korrigiert werden (kurzsichtiges Auge). Wenn sie dagegen zu schwach gekrümmt ist, so muß durch gewölbte Gläser geholfen werden (weitsichtiges Auge).

Brillen waren übrigens seit dem 13. Jahrhundert bekannt. Als Erfinder wird gewöhnlich der Florentiner Salvino degli Armati (gest. 1317) genannt, wenigstens war er auf seinem Grabstein als solcher bezeichnet. Die Erfindung ist natürlich ohne ein klares Verständnis durch Zufall und durch Probieren gemacht worden.

§ 110. Endlich gab Kepler die richtige Erklärung, die ihn nach seiner eigenen Aussage drei Jahre Arbeit gekostet hatte. Er sagt, daß hinten im Auge gerade so wie auf der Rückwand einer Dunkelkammer ein wirkliches Bild entstehe. Das Bild muß ein umgekehrtes sein. Daß wir trotzdem die Dinge aufrecht sehen, hat nach Keplers Meinung seinen Grund darin, daß jede Stelle der Netzhaut gewissermaßen einen Stoß bekommt und daß wir durch eine seelische Tätigkeit die Ursache des Stoßes auf die Richtung zurückführen, aus welcher der Stoß kommt.

Nun war die Erklärung für die Wirkung der Brille sehr einfach. Wenn die Kristalllinse im Hintergrund des Auges kein scharfes Bild erzeugt, so muß eine Brille der einen oder der anderen Art das Sammlungsvermögen der Linse verstärken oder vermindern, so daß die Strahlen an der richtigen Stelle zusammenkommen.

Weniger glücklich war Kepler in der Erklärung des Akkommodationsvermögens des Auges, d. h. der Fähigkeit, sich verschiedenen Entfernungen

Digitized by Google

anzupaſſen. Je mehr der Gegenſtand genähert wird, deſto weiter nach hinten fällt das Bild, und Kepler glaubte, das Auge habe die Fähigkeit, ſich mehr oder weniger in die Länge zu ziehen, je nachdem der Gegenſtand näher oder weiter entfernt iſt.

§ 111. Hier wurde die richtige Erklärung von Scheiner (§ 104) gegeben, der das Bild in einem Ochſenauge und ſpäter in einem Menſchen-

Fig. 103.

Leonardo da Vinci.

auge beobachtete, nachdem er von der hinteren Wand des Auges ſo viel hinweggeſchält hatte, daß das Bild durchſchimmerte.

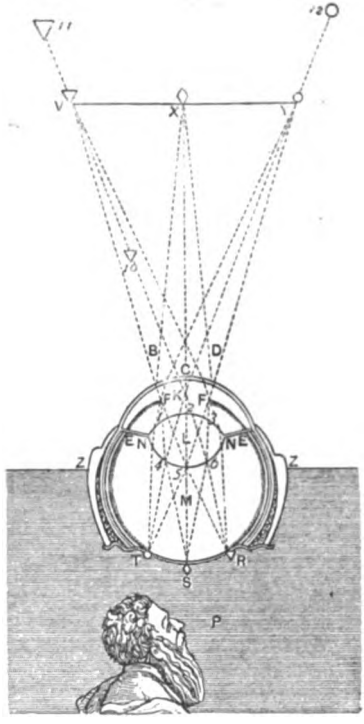
Die Augenwand beſteht zum Teil aus der klaren durchſichtigen Hornhaut C (Fig. 104, a. f. S.), zum Teil aus der weißen harten Haut ESE, die auf der Innenſeite von der ſchwarzen farbigen Aderhaut bedeckt wird, auf welcher ſich die feingebaute Netzhaut ausbreitet. In dieſer verzweigen ſich die Nervenfaſern des Sehnerven. Nachdem die Lichtſtrahlen durch die Hornhaut eingedrungen ſind, gehen ſie weiter durch die wäſſerige Flüſſigkeit, treten durch eine runde Öffnung in der Regenbogenhaut (Iris), die Pupille K, in die Kriſtalllinſe L, gehen dann durch den Glaskörper M und treffen ſchließlich die Netzhaut, auf der ſie ein Bild erzeugen.

Scheiner erklärte das Anpaſſungsvermögen des Auges dadurch, daß die Form der Kriſtalllinſe durch die Tätigkeit einiger Muskeln etwas verändert werden kann. Er fand, daß die Linſe ein ſtärkeres Lichtbrechungsvermögen hat, als die anderen Subſtanzen, welche das Licht auf ſeinem

Digitized by Google

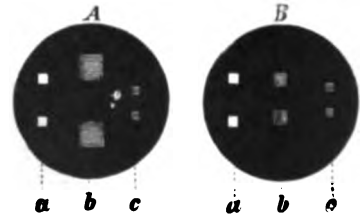
Wege im Auge durchläuft. Eine Abplattung der Linse bewirkt daher, daß die Linse schwächer sammelt, daß sie sich also für eine weitere Entfernung einstellt, während eine Verdickung der Linse stärkere Brechung bewirkt und das Auge für geringere Entfernungen einstellt. Das letztere Anpassungs-

Fig. 104.



Cartesius' Zeichnung des Auges.

Fig. 105.



Spiegelbilder im Auge, wenn es auf die Ferne (*A*) oder auf die Nähe (*B*) eingestellt ist.

vermögen hat natürlich seine Grenze in der Sehweite, die nach der Erklärung des Aristoteles ihren Grund darin haben sollte, daß zwischen dem Auge und dem Gegenstand Luft sein müsse.

Fig. 105 zeigt die Spiegelbilder, die man in einem Auge sieht, welches auf zwei leuchtende Quadrate gerichtet ist; *a* ist das von der Hornhaut (Konvexspiegel) erzeugte Spiegelbild, *b* das von der vorderen Seite der Kristalllinse (flacherer Konvexspiegel) und *c* das von der hinteren Seite der Kristalllinse (Hohlspiegel) erzeugte Bild. Das Auge *A* ist auf die Ferne, das Auge *B* auf die Nähe eingestellt. Die von der Vorderseite der Kristalllinse erzeugten Bilder nehmen eine andere Größe an, wenn das Auge auf eine andere Entfernung eingestellt wird.

Die Regenbogenhaut steht unter dem Einfluß eines ringförmigen Muskels, des sogenannten Ciliarkörpers, von dem zahlreiche strahlenförmige Fasern ausgehen. Unter der Einwirkung eines Nerven öffnen diese Muskeln die Pupille im Dunkeln und verengern sie im Hellen. Dies hat auf die Größe und Form des Bildes auf der Netzhaut keinen Einfluß, sondern nur auf die Lichtstärke desselben.

Scheiner zeigte ferner, daß Lichtstrahlen, welche die rechte Seite der Rückwand des Auges treffen, als von der linken Seite des Gegenstandes herkommend aufgefaßt werden. Betrachtet man nämlich durch ein kleines

Digitized by Google

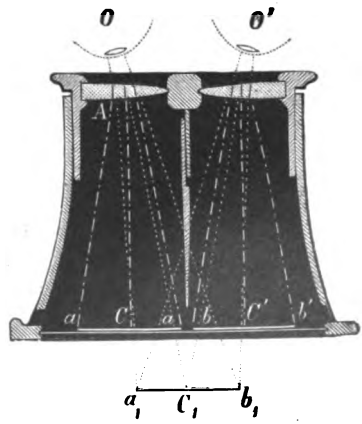
Loch (Stich mit einer Stecknadel) in einem Stück Papier, welches man dicht vor das Auge hält, eine Flamme und bewegt dann eine Messerklinge zwischen dem Auge und dem Papier von rechts nach links, so wird zuerst die linke und dann die rechte Seite der Flamme durch die Messerklinge verdeckt.

Der Sehnerv tritt nicht in der Mitte der Rückseite des Auges ein, da, wo wir einen Gegenstand, den wir betrachten, am deutlichsten wahrnehmen, sondern etwas mehr nach der Nase zu. Als der französische Physiker Mariotte einst mit Untersuchungen über die Empfindlichkeit dieser Stelle der Netzhaut beschäftigt war, fand er zu seinem Erstaunen, daß man an dieser Stelle vollständig blind ist. Hiervon kann man sich leicht überzeugen, wenn man das linke Auge schließt, das rechte auf das Kreuz richtet und dann das Papier in einer Entfernung von etwa 20 cm annähert und entfernt, bis der Fleck rechts verschwindet.

+ ■

Wenn ein Gegenstand hinreichend beleuchtet ist oder selbst leuchtet, so ist nur ein Augenblick erforderlich, damit er seine Wirkung auf das Auge ausübt. Nachts ist ein Blitz, der nicht eine tausendstel Sekunde dauert, hinreichend, um im Auge eine deutliche Empfindung der Umgebung hervorzurufen. Dagegen verschwindet ein empfangener Eindruck nicht augenblicklich. Daher wird eine bewegte Feuerkugel als eine feurige Linie wahrgenommen. Aus demselben Grunde macht ein in Bewegung begriffener Eisenbahnzug, der im Dunkeln von einem Blitz beleuchtet wird, den Eindruck, als ob er stillstände, weil die Dauer der Beleuchtung so kurz ist, daß man eine Änderung in der Stellung des Zuges und der Räder nicht bemerken kann. Hierauf beruht ferner das Thaumatrop, das in seiner einfachsten Form aus einer Karte besteht, die auf jeder Seite eine Abbildung zeigt, z. B. auf der einen einen Vogel und auf der anderen einen Vogelbauer. Befestigt man an jeder Seite der Karte ein Stückchen Faden und versetzt die Karte durch Drillen der Fäden zwischen den Fingern in schnelle Rotation, so folgen die beiden Bilder auf der Netzhaut so schnell aufeinander, daß man den Vogel im Bauer erblickt.

Fig. 106.



Das Stereoskop.

Jedes Auge sieht einen Gegenstand von seinem Standpunkt aus. Das rechte Auge sieht ihn mehr von der rechten, das linke Auge mehr von der linken Seite. Das Bild im rechten Auge ist also von dem Bild im linken Auge etwas verschieden. Leonardo da Vinci sagt, daß ein Gemälde auf

Digitized by Google

zwei Augen niemals vollkommen täuschend wirken könne, da jedes Auge ein besonderes Bild vom Gegenstande haben müsse. Dem Engländer Wheatstone ist es jedoch gelungen, in jedem Auge gerade den Eindruck hervorzubringen, der erforderlich ist, wenn er die Empfindung hervorrufen soll, als ob man einen körperlichen Gegenstand betrachte.

Das zu diesem Zwecke konstruierte und von Brewster verbesserte Instrument ist das Stereoskop (Fig. 106, a. v. S.). Die beiden Linsen, durch welche die beiden Augen die beiden etwas verschiedenen Photographien betrachten, haben zugleich die Form von Prismen, wodurch das Zusammenfallen der beiden Bilder leichter erreicht wird.

Digitized by Google

Die Kraft.

Digitized by Google

Digitized by Google

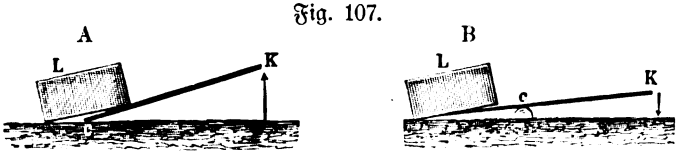
Die Kraft.

Gleichgewicht fester Körper.

§ 112. Die gewaltigen Ruinen des Altertums (Fig. 108, a. f. S.) beweisen zur Genüge, daß man damals mit Massen umzugehen verstand, zu deren Bewältigung die unmittelbare Muskelkraft bei weitem nicht ausreicht. Ist doch der Transport und die Aufstellung jener Obelisken, mit denen die alten Ägypter den Eingang zu ihren Tempeln verzierten — viereckige Steinsäulen von einer Höhe bis zu 40 m — selbst heute noch mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Die Völker des Altertums müssen also Mittel gehabt haben, Lasten zu bewegen, die durch die unmittelbare Wirkung der Muskelkraft nicht bewältigt werden können, und es kann keinem Zweifel unterliegen, daß hierbei der Hebel eine wichtige Rolle gespielt hat.

Die Erfindung des Hebels ist eine so naheliegende, daß sich über den Zeitpunkt derselben nichts sagen läßt. Der Hebel, sowohl der einarmige als auch der zweiarmige, ist ohne Zweifel lange bekannt gewesen, ehe die hohe Kulturstufe, von der die genannten Ruinen Zeugnis ablegen, erreicht wurde. Man nennt ihn einarmig, wenn die Stange an dem einen Ende unterstützt ist (Fig. 107), wenn also die Last *A* und die Hand (der Pfeil) sich auf der-

Fig. 107.

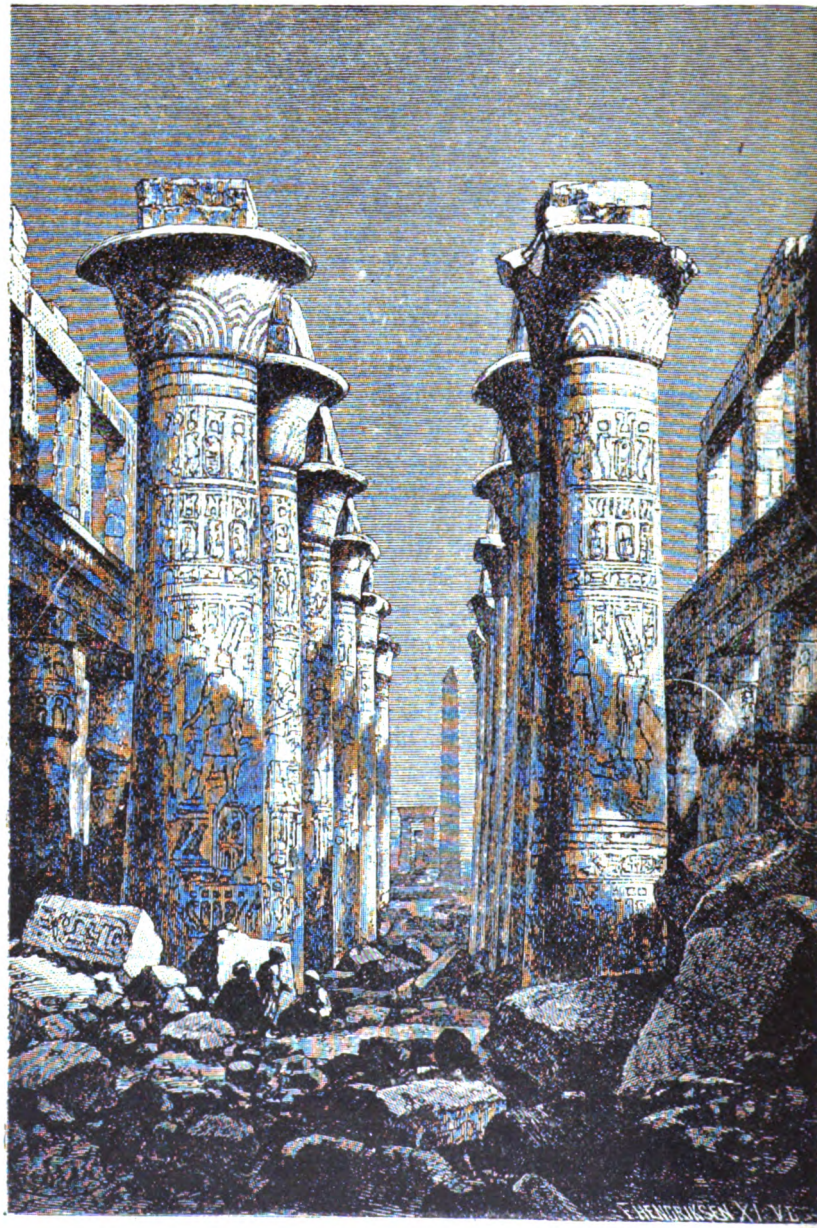


Einarmiger (A) und zweiarmiger (B) Hebel.

selben Seite des Unterstützungspunktes befinden und daher nach entgegengesetzter Richtung wirken, die Last nach unten und die Hand nach oben. Er heißt zweiarmig, wenn die Last *B* an dem einen Ende und die Hand am anderen Ende in derselben Richtung (nach unten) wirken, während ein Punkt zwischen der Last und der Hand unterstützt ist. Man merkt leicht, daß die Kraft, die zur Bewegung des Hebels erforderlich ist, um so kleiner ist, je näher der Unterstützungspunkt nach der Last hin liegt.

Digitized by Google

Fig. 108.



Ruinen des Tempels von Karnak in Oberägypten.

Digitized by Google

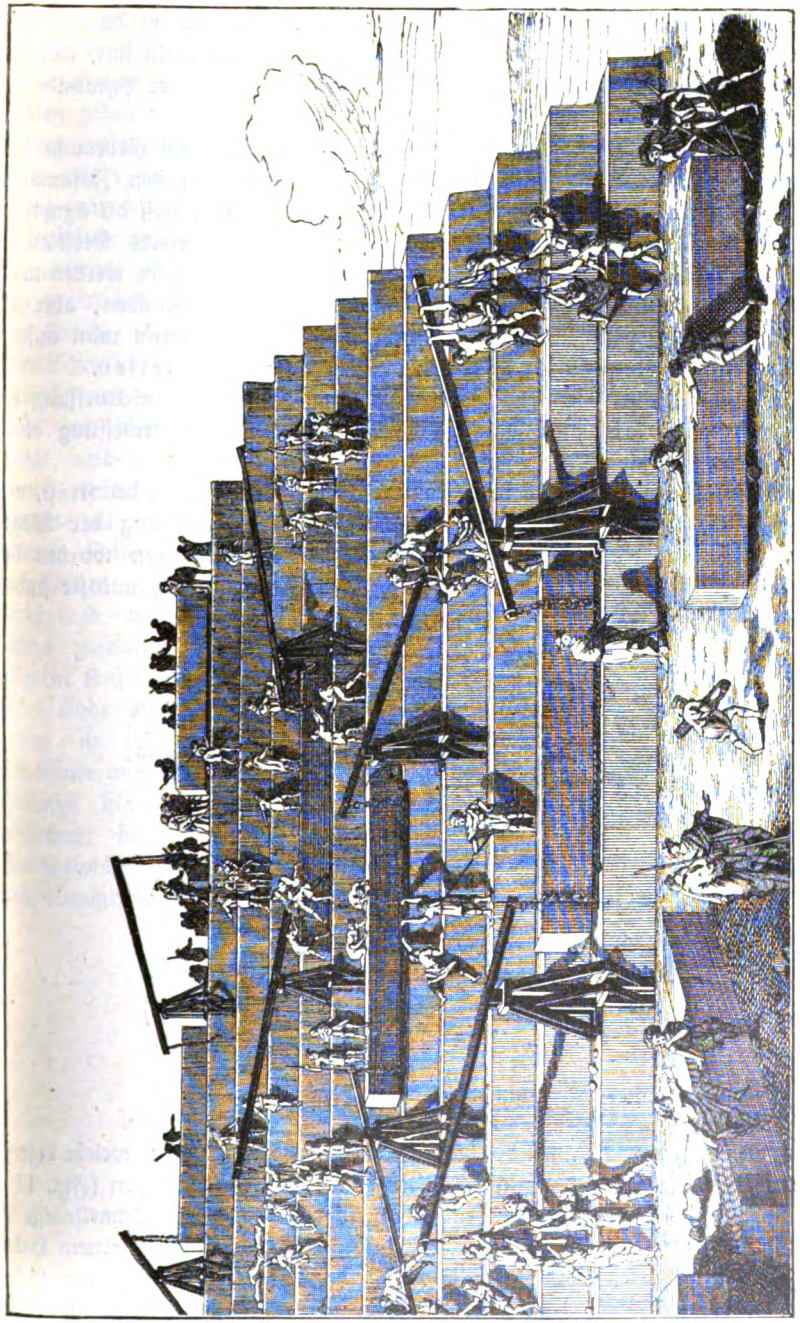


Fig. 109. Pyramidenbau im Altertum.

Digitized by Google

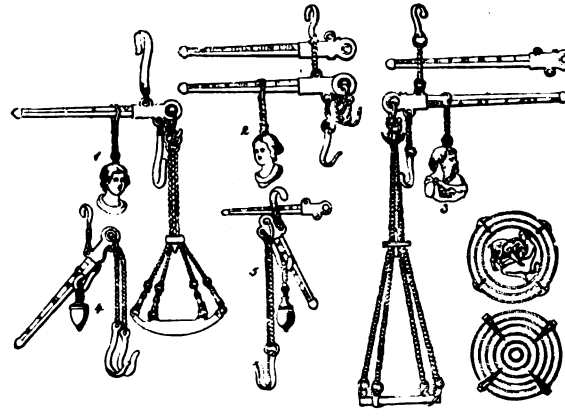
Die Anwendung des Hebels bei der Ausführung von Bauten im Altertum wird durch Fig. 109 (a. v. S.) veranschaulicht. Personen im Vordergrunde stoßen den Stein, der auf Rollen ruht, mit einarmigen Hebeln fort, während andere den Stein mit zweiarmigen Hebeln von einer Stufe der Pyramide auf die andere hinaufschaffen.

§ 113. Daß man eine erfahrungsmäßige Fertigkeit im Gebrauche derartiger Hilfsmittel erlangte, beweist jedoch nicht, daß man den Zusammenhang verstanden hat, und es liegt kein Beweis dafür vor, daß die ägyptische Priesterschaft, welche diese Unternehmungen leitete, ein tieferes Verständnis der Vorgänge gehabt hat. Daß überhaupt eine Kraft ausgeübt werden muß, kann schon Veranlassung geben, den Zusammenhang zu ergründen, aber als ein wesentlicher Fortschritt muß es doch bezeichnet werden, wenn man anfing, von der Größe der Kraft zu sprechen — die Kraft zu messen.

Ebenso wie die Chaldäer die Kreismessung und die Winkelmessung begründeten (§ 11), so machten sie auch hinsichtlich der Kraftmessung einen bedeutenden Fortschritt.

Alles Wägen ist ja eigentlich Messen einer Kraft, nämlich der Kraft, mit der ein Ding nach unten gezogen wird, und die Entwickelung der Wägevorrichtungen verliert sich in der vorhistorischen Zeit. Wagen wurden besonders von industrie- und handeltreibenden Völkern gebraucht, und sie finden

Fig. 110.



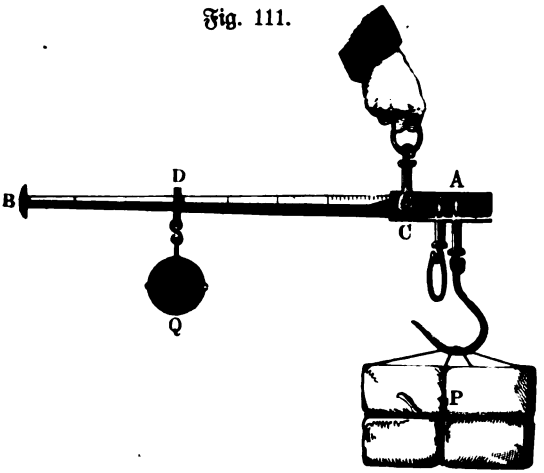
Schnellwagen aus Pompeji.

sich in verschiedenen Formen bei den meisten gebildeten Völkern, welche eigentliche Kulturgegenstände hinterlassen haben. Zierliche Schnellwagen (Fig. 110) hat man bei den Ausgrabungen in Pompeji gefunden. Die Schnellwage ist ein zweiarmiger Hebel, der in einiger Entfernung vom Ende an einem Haken aufgehängt wird. An diesem Ende hängt dann außerdem noch ein Haken (4) oder eine Schale (1) zum Tragen der Ware, die gewogen werden soll. An dem anderen, dem längeren Hebelarme kann ein Gewicht — bei den pom-

Digitized by Google

pejanischen Wagen oft von der Form eines Menschenkopfes — hin und her geschoben werden, bis es die Wage im Gleichgewicht hält. Je weiter das Gewicht nach dem Ende hin geschoben werden muß, um das Gleichgewicht hervorzubringen, desto schwerer ist die Ware, und ein- für allemal angebrachte Zahlen geben an, wie groß das Gewicht der Ware, der Stellung des Gewichtes entsprechend, ist. An den meisten Schnellwagen ist auf der anderen Seite, näher nach dem Ende hin, noch ein zweiter Handhaken angebracht. Wenn man die Wage an diesem aufhängt, können mit derselben schwerere Gegenstände gewogen werden. Die entsprechenden Zahlen befinden sich auf der anderen Seite des Wagebalkens. Wie wenig die heutige Schnellwage von denen des Altertums abweicht, ist aus Fig. 111 ersichtlich.

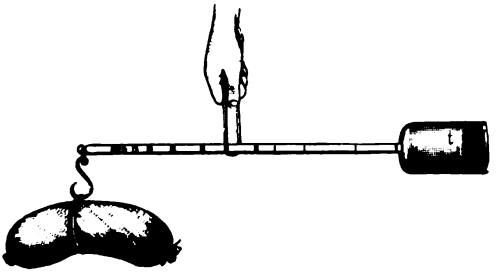
Fig. 111.



Die heutige Schnellwage.

Bei der skandinavischen Schnellwage ist das Gewicht an dem einen Ende des Balkens befestigt, und der Gegenstand, welcher gewogen werden soll, wird am anderen Ende desselben aufgehängt. Das Gewicht und die Stange bilden zusammen eine hölzerne Keule, in deren dickes Ende Blei eingegossen ist (Fig. 112). Die Keule wird in einer Schlinge hin und her geschoben, bis sie im Gleichgewicht schwebt. An der Stange sind, wie bei der gewöhnlichen Schnellwage, Marken und Zahlen angebracht, die das dem jedesmaligen Unter-

Fig. 112.



Die skandinavische Schnellwage.

stützungspunkt entsprechende Gewicht angeben. Diese Einteilung ist aber ungleichmäßig, wie sie sein muß, wenn die Marken von Pfund zu Pfund gehen sollen.

Digitized by Google

§ 114. Die schwierigste Aufgabe bei der Aufstellung eines geregelten Maßsystems bildet die Wahl einer Maßeinheit und die Angabe eines Verfahrens, durch welches man diese jederzeit festsetzen und wiederfinden kann. Man hat gewöhnlich die Dimensionen eines leicht zugänglichen Naturobjektes als Maßeinheit benutzt. Dabei bekam man aber oft recht veränderliche und unsichere Maße. Als Längenmaße hat man am häufigsten Teile des menschlichen Körpers benutzt, z. B. Zoll (Daumen), Spanne, Fuß, Elle (Arm), Klafter. Häufig sind auch Früchte und Samen, z. B. Gerstenkorn (§ 57), Mohnsamen, Dattelkern, als Maß benutzt worden. Als Beispiel eines Maßsystems kann eine Verordnung König Ottokars II. von Böhmen (1253 bis 1278) angeführt werden: „Vier mit der Seite aneinandergelegte Gerstenkörner gelten einen Querfinger, zehn Querfinger eine Spanne; ein Maß Weizen ist so viel, als man in beiden Händen halten kann." Ein anderes Beispiel, ein richtiges Normalmaß (Fuß) zu schaffen, findet sich noch in einer Schrift, die im Jahre 1584 in Frankfurt erschienen ist. „Man soll 16 Männer, große und kleine, etwa so wie sie aus der Kirche kommen, jeden einzeln einen Schuh vor den andern setzen lassen; diese Länge soll ein richtiger allgemeiner Maßstab sein, mit dem man die Fluren messen soll." Andere schlugen vor, den Abstand der beiden Pupillen eines erwachsenen Menschen als Maß zu benutzen.

Über neuere und zugleich bestimmtere, aber auch weniger leicht zugängliche Methoden, die Längeneinheit festzusetzen, wird später näheres mitgeteilt werden. Dabei kommt namentlich der Fallraum der ersten Sekunde, die Länge des Sekundenpendels (Huygens) und der Umfang der Erde (vergl. § 28) in Betracht. Schließlich ist das Meter als die Länge eines Platinstabes festgesetzt worden, der in Paris aufbewahrt wird.

Da schon die Festsetzung einer einzigen Maßeinheit (Längeneinheit) solche Schwierigkeiten bietet, würde es offenbar ein großer Gewinn sein, wenn die verschiedenen Arten der Einheiten untereinander in einen ganz bestimmten Zusammenhang gebracht würden. Es ist das große Verdienst der Chaldäer, zum erstenmal diesen wichtigen Schritt getan zu haben, und zwar mit Rücksicht auf die Hauptarten der Messung, die Messung des Raumes, der Kraft, des Wertes und der Zeit.

Ist nämlich zunächst das Längenmaß festgesetzt, so ergibt sich aus diesem die Flächeneinheit und die Raumeinheit. Das erstere ist das Quadrat der Längeneinheit und das letztere ein Würfel, dessen Kante die Längeneinheit ist. Das Gewicht einer solchen Raumeinheit Wasser, das babylonische Talent, war die Gewichtseinheit und folglich die Krafteinheit. Dasselbe Gewicht Silber war die Werteinheit. Endlich regulierten die Chaldäer ihre Wasseruhren, Bronzegefäße mit einer Öffnung, die so reguliert waren, daß ein Talent Wasser in $^1/_{24}$ Tag ausfloß. So wurde dieser Teil des Tages die Zeiteinheit. Die Herstellung dieses Zusammenhanges zwischen den verschiedenen Maßeinheiten bezeichnet einen bedeutenden Fortschritt in den Naturwissenschaften, und es ist

Digitized by Google

daher nicht zu verwundern, daß das Maßsystem der Chaldäer bei den Ägyptern, den Griechen, Römern und anderen Völkern Eingang fand.

Erst in der neuesten Zeit hat man ein derartiges System von neuem durchgeführt, indem ein Würfel, dessen Kante $^1/_{10}$ Meter ist, die Raumeinheit (Liter) und das Gewicht eines solchen Würfels Wasser die Gewichtseinheit (Kilogramm) bildet. Bei der heutigen Vollkommenheit der Instrumente und bei unseren heutigen Verkehrsverhältnissen bietet die allgemeine Einführung eines Urmaßes weit weniger Schwierigkeiten, als zur Zeit der Chaldäer. Um so mehr ist es zu bedauern, daß sich bis jetzt noch nicht alle Kulturvölker dem metrischen Maßsystem angeschlossen haben, sondern daß in manchen Ländern (Dänemark, England) noch Maßeinheiten gebraucht werden, die in gar keinem Zusammenhange untereinander stehen.

§ 115. Die Astronomie war bei den Ägyptern und Chaldäern mit äußeren Hilfsmitteln, großartigen Visier- und Meßvorrichtungen, ausgestattet und später durch die Griechen mit dem Denkwerkzeug (der Mathematik) bereichert und mit Genialität behandelt worden, und eine ähnliche Entwickelung hat auch die Behandlung der Kräfte durchgemacht. Etwas Großartigeres als die ägyptischen Bauwerke gibt es nicht, und das Maßsystem der Chaldäer ist an und für sich unübertrefflich. Ein eigentliches Naturgesetz über die Kräfte haben jedoch, wie es scheint, diese Völker nicht erkannt. Die Lehren der griechischen Philosophen vom 6. bis zum 4. Jahrhundert hatten zu einer Überschätzung der Leistungsfähigkeit des Denkens geführt, das nach Platon zur Erkenntnis des ewig unveränderlichen, der Ideen, führen sollte. Bis in das 3. Jahrhundert v. Chr. blickten die griechischen Gelehrten auf mechanische Beschäftigungen mit Geringschätzung herab, namentlich, wenn man mit mechanischen Hilfsmitteln da eingreifen wollte, wo das bloße Denken nicht zum Ziel führte.

Fig. 113.

Archimedes.

Aristoteles, der in verschiedener Hinsicht ein Gegner Platons war, hat allerdings ein Buch über die Kräfte geschrieben; dasselbe enthält aber so viel Falsches, daß es in späteren Zeiten oft ein Hindernis für die Erkenntnis der Wahrheit gebildet hat (vergl. § 59).

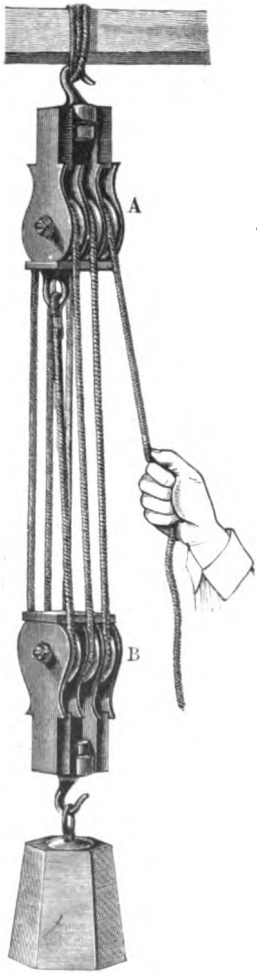
Aber im 3. Jahrhundert v. Chr. kam die Mechanik, die Lehre von den Gesetzen der Kräfte sozusagen zum Durchbruch, und zwar mit dem Auftreten eines der größten Denker, die jemals gelebt haben, Archimedes von Syrakus. Der Durchbruch dieser Wissenschaft erfolgte mit einer solchen Stärke und Klarheit, und er

Digitized by Google

umfaßte eine solche Fülle wissenschaftlicher Wahrheiten, daß die Geschichte der Wissenschaften kaum von etwas Ähnlichem zu berichten weiß.

§ 116. Archimedes (287 — 212 v. Chr.) war ein Verwandter des Königs Hiero, der damals (269 — 215) Syrakus beherrschte. Er hat aber, wie es scheint, die Verwandtschaft nicht dazu benutzt, sich eine einflußreiche Stellung zu verschaffen, sondern er hat seine Befriedigung in der Beschäftigung mit Mathematik und Mechanik gefunden. Er soll 40 Maschinen erfunden haben, darunter den Flaschenzug, die Archimedische Schraube oder Wasserschnecke und die „Schraube ohne Ende". Vermittelst des Flaschenzuges (Fig. 114) kann man bekanntlich durch einen verhältnismäßig geringen Zug an einem Seil eine schwere Last heben. Die Wasserschnecke und die Schraube ohne Ende beruhen beide auf dem Umstande, daß, wenn eine Schraube um ihre Achse gedreht wird, eine einzelne Stelle des Gewindes von dem einen Ende der Schraube nach dem anderen zu gleiten scheint. Die Wasserschnecke (Fig. 115) besteht aus einer schräg gestellten Trommel mit einem hohlen Schraubengewinde. Bei jeder Umdrehung taucht der unterste Schraubengang in das Wasser ein und nimmt eine gewisse Menge Wasser auf, die durch die weiteren Umdrehungen der Schraube in die Höhe gehoben wird und schließlich am oberen Ende der Schraube ausfließt. Die Wasserschnecke ist eine ausgezeichnete Wasserhebungsmaschine, die auch heute noch vielfache Anwendung findet. Eine ähnliche Verschiebung erteilt die Schraube ohne Ende (Fig. 116) durch ihre Drehung dem Zahnrade, so daß dieses bei jeder Umdrehung der Schraube um einen Zahn weitergeht.

Fig. 114.



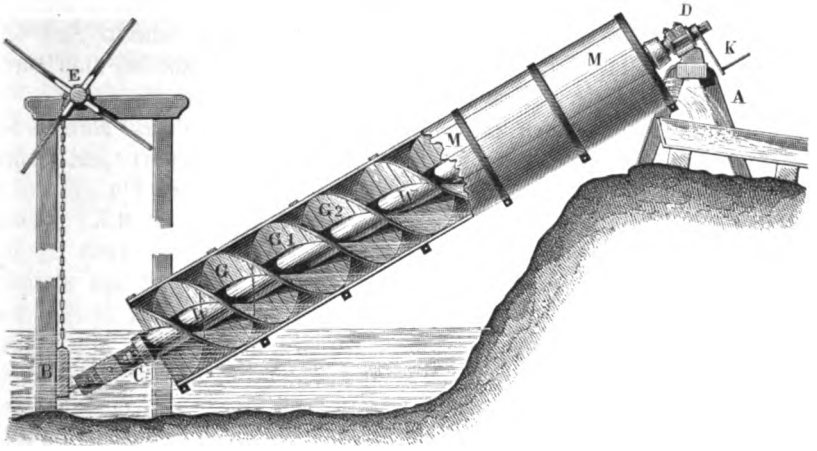
Flaschenzug.

§ 117. Als Syrakus nach dem Tode des Königs Hiero mit dem mächtigen Rom in Krieg verwickelt wurde, zeigte die Stadt dem römischen Heere unter Appius Claudius und der römischen Flotte unter Marcellus gegenüber eine außerordentliche Widerstandskraft, die die Stadt nach dem einstimmigen Zeugnis zeitgenössischer und späterer griechischer und römischer Schriftsteller dem Archimedes verdankte. Polybius ruft aus: „So groß war die Macht eines einzigen Mannes, so groß die Wirkungen seines Genies. Bei so ansehnlichen Streitkräften zu Land und zu Wasser würde die Stadt beim ersten Angriff in die Hände der Römer gefallen sein, wenn nicht dieser Greis in

Digitized by Google

Syrakus gewesen wäre. Archimedes ist innerhalb der Mauern der Stadt, und die Römer wagten sich nicht an dieselben heran." — Als das Landheer die Stadt zu erstürmen versuchte, wurden die Legionen durch einen Regen von kleinen Steinen zurückgetrieben, die ihnen die Wurfmaschinen des Archi-

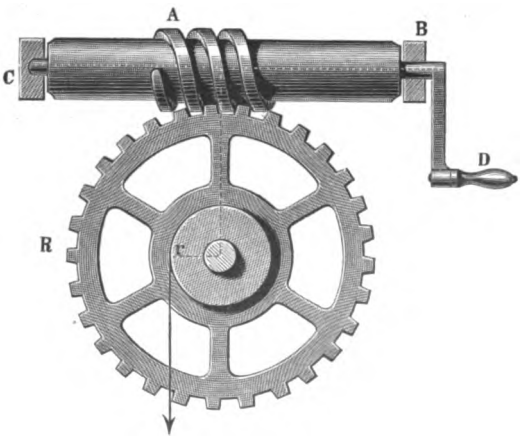
Fig. 115.



Wasserschnecke.

medes entgegenschleuderten. Als Marcellus mit der Sambuca, einer gewaltigen Sturmleiter, auf zwei Schiffen heranrückte, wurde die Sambuca durch große Steine, die von anderen Maschinen geschleudert wurden, zertrümmert. Ebenso hatte er passende Geschütze, wenn sich die Soldaten des Marcellus unter einem Schilddach im Dunkel der Nacht den Mauern näherten. Als aber doch einige von ihnen standhielten und sich den Mauern näherten, so erschien, wie Polybius erzählt, plötzlich über der Mauer das eine Ende eines Hebels, von dem eine an einer Kette befestigte eiserne Hand auf das Schiff herabfiel und das Tauwerk und das Deck ergriff. Dann wurde das Schiff durch Herabziehen des Hebels hinter der Mauer in die Höhe gehoben, einen Augenblick schwebend gehalten und dann losgelassen, so

Fig. 116.



Schraube ohne Ende.

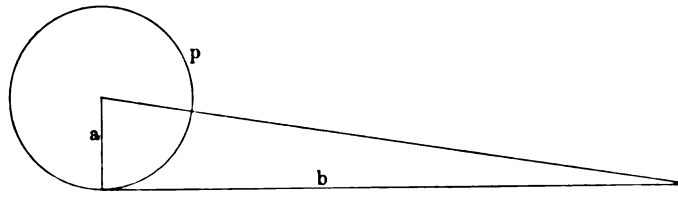
Digitized by Google

daß es mit Wucht in das Meer fiel, wo es sich mit Wasser füllte oder auf den Klippen zerschellte.

Als die Römer endlich einsahen, daß sie sich darauf beschränken mußten, die Stadt einzuschließen und auszuhungern, soll nach dem Bericht eines viel späteren Schriftstellers (Anthemius) Archimedes die feindliche Flotte durch Hohlspiegel in Brand gesetzt haben, was jedoch im höchsten Grade unwahrscheinlich ist. Etwas Ähnliches hat man nämlich in der neueren Zeit vergebens versucht. Auch würden es die älteren Schriftsteller sicherlich nicht unterlassen haben, über diese Tat zu berichten.

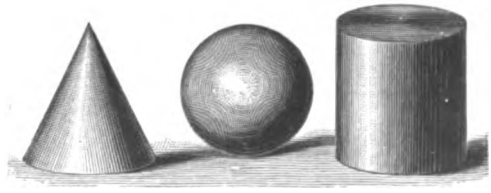
§ 118. Die genannten mechanischen Arbeiten haben den Namen des Archimedes weltberühmt gemacht, so daß man die Redensart „ein wahrer

Fig. 117.



Archimedes" gebraucht, um ein mechanisches Genie zu bezeichnen. Und doch legte Archimedes auf diese Leistungen keinen sehr hohen Wert. Er stimmte mit Platon darin überein, daß derartige Dinge nur Kleinigkeiten sind im Vergleich mit reiner Gedankenarbeit. — Archimedes hat zahlreiche Schriften verfaßt, in denen er die schwierigsten mathematischen und mechanischen Aufgaben mit einer Ruhe und Klarheit behandelt, als ob es sich um die einfachsten Dinge handle. Besonders schwierig waren Probleme, bei denen es sich um eine unendlich große Anzahl unendlich kleiner Größen handelt, z. B. die Berechnung des Kreisumfanges, der als die Summe unendlich vieler, aber unendlich kleiner Linien betrachtet werden kann. Die Mathematiker des 5. und des 4. Jahrhunderts waren nicht imstande, den Flächeninhalt des Kreises zu berechnen. Allein Archimedes zeigte mit der ihm eigenen Ruhe und Überlegenheit, daß der Inhalt des Kreises gleich einem rechtwinkligen Dreieck ist, dessen eine Kathete a gleich dem Radius r (Fig. 117) und dessen andere Kathete b gleich dem Umfang p des Kreises ist. Was die Größe des Umfangs selbst betrifft, so bewies Archimedes, daß er kleiner als das $3\frac{1}{7}$fache und größer als das $3\frac{10}{71}$fache des Durchmessers ist. Der Unterschied der beiden Zahlen ist nur $\frac{1}{497}$.

Fig. 118.



„Archimedes' Meisterwerk."

Digitized by Google

In einem anderen Buche hat Archimedes bewiesen, daß, wenn die Grundflächen eines Kegels und eines Cylinders denselben Durchmesser haben wie eine Kugel, und wenn auch die Höhen dieser beiden Körper dieselbe Größe haben, sich die Rauminhalte der drei Körper wie 1:2:3 verhalten (Fig. 118). Auch die Berechnung der krummen Flächen ist nur mit Hilfe des Unendlichen (in Anzahl und Kleinheit) möglich; und es ist nicht zu verwundern, daß ein Mann, der zuerst derartige Aufgaben lösen kannte, und zwar nicht nur annähernd, sondern absolut genau, so großes Vergnügen daran fand, daß er den Wunsch aussprach, auf seinem Grabe möge eine Kugel und ein Cylinder als Denkmal aufgestellt werden.

§ 119. In einem anderen Buche gibt Archimedes eine Zahl an, die größer ist, als die Anzahl der Sandkörner, die den ganzen Weltraum anfüllen würden. Die Zahlnamen der Griechen erstreckten sich nämlich nicht weiter als bis zu einer Myriade (10 000). Archimedes zeigt nun, wie man eine Myriade von Myriaden zählen und das Resultat (100 000 000) als eine Einheit zweiten Ranges betrachten könne. Nun kann man von diesen Einheiten wieder eine Myriade von Myriaden zählen. Hierdurch kommt man zu einer Einheit dritten Ranges. Mit dieser fängt man die Zählung von neuem an und bekommt eine Einheit vierten Ranges u. s. w. Archimedes nimmt nun an, daß der Radius des Fixsternhimmels auf 10 000 000 000 Stadien angesetzt werden könne und daß 10 000 Sandkörner dasselbe Volumen wie ein Mohnkorn einnehmen, von dem 40 nebeneinander gelegt, mehr als eine Fingerbreite einnehmen. Unter dieser Annahme berechnet er, daß die Anzahl der Sandkörner, die den ganzen Weltraum ausfüllen würden, tausend Myriaden der achten Zahlordnung beträgt. Dies ist nach unserer Schreibweise eine Zahl, die mit 1 und 63 Nullen geschrieben wird. — Ein ganzes Buch über diese Sache könnte als unnütze Spielerei erscheinen, aber es ist in Wirklichkeit der Ausfluß eines Riesengeistes, der seine Kraft versuchen will, um über die Grenzen der unmittelbaren Sinneseindrücke hinauszugreifen.

§ 120. Wenn wir jetzt dazu übergehen, einige Sätze kennen zu lernen mit denen Archimedes die Mechanik begründete, können wir uns leider nicht durchweg der Darstellungsweise anschließen, die sich in seinen Schriften findet. Dies würde zu viel Platz beanspruchen und auch mehr mathematische Kenntnisse erfordern, als hier vorausgesetzt werden können. Aber die Darstellung selbst ist bewundernswert durch ihre großartige Einfachheit.

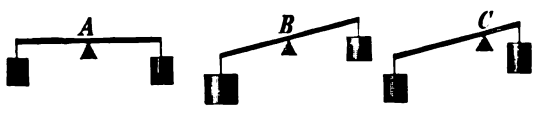
Plutarch (zirka 100 n. Chr.) schreibt hierüber: „In der ganzen Mathematik wird man nirgends schwierigere und verwickeltere Aufgaben in einfacherer und deutlicherer Weise gelöst finden, als bei Archimedes . . . Hat man sich selbst vergebens abgemüht, den Beweis für einen Satz zu finden, und holt sich dann Rat bei Archimedes, so bekommt man sofort den Eindruck, als ob man den Beweis selbst hätte finden müssen; auf einem so leichten und kurzen Wege wird man zu dem hingeführt, was man beweisen will."

§ 121. Archimedes geht in der Mechanik ebenso wie in der Mathematik von einfachen Dingen aus, die niemand bezweifelt, z. B.: Wirken

Digitized by Google

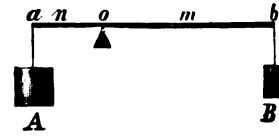
gleiche Gewichte an gleichen Hebelarmen, so halten sie einander das Gleichgewicht, Fig. 119 *A*; wirken ungleiche Gewichte an gleichen Armen, so ist kein Gleichgewicht vorhanden, *B*, sondern das größere Gewicht sinkt; wirken gleiche Gewichte an ungleichen Armen, *C*, so ist kein Gleichgewicht vorhanden, sondern der längere Arm sinkt u. s. w. Von diesen einfachsten Fällen kommt er dann durch reine Gedankenschlüsse zu Sätzen über schwierigere Verhältnisse.

Fig. 119.



Archimedische Grundsätze.

Fig. 120.

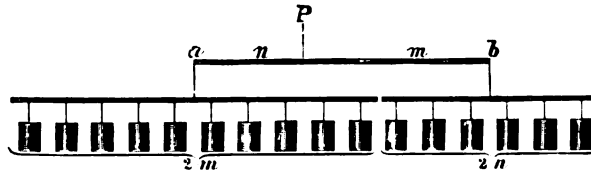


Hebel im Gleichgewicht.

Vom ungleicharmigen Hebel sagt er, daß er im Gleichgewicht ist, wenn sich die Gewichte umgekehrt wie die Länge der Hebelarme verhalten. Der Hebel (Fig. 120) ist also z. B. im Gleichgewicht, wenn sich *A* zu *B* verhält wie *m* zu *n*. Den Beweis für diese Behauptung führt er ungefähr in folgender Weise.

Das Verhältnis von *n* und *m* sei 3 : 5 und das Verhältnis von *A* und *B* also 5 : 3. Dann kann man sich das Gewicht *A* in 2 . 5 oder 10 kleine Gewichte, und das Gewicht *B* in 2 . 3 oder 6 kleine Gewichte von derselben Größe geteilt denken. Wird ebenso die Linie *n* in 3 und die Linie *m* in 5 gleiche Teile geteilt, so kann man sich ferner eine Linie von der Länge 2*m* oder 10 denken, an welcher die kleinen Gewichte von *A*, in der Mitte eines jeden der Teile eins, aufgehängt sind. Diese Linie mit den kleinen Gewichten ist in Fig. 121 mit 2*m* bezeichnet. Sie ist mit Rücksicht

Fig. 121.



Beweis für das Gleichgewicht am Hebel.

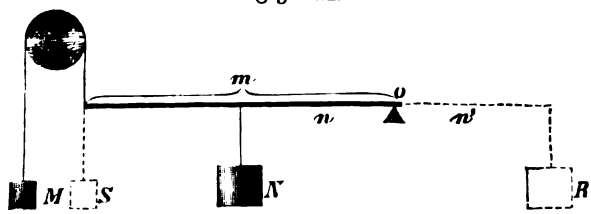
auf die obenstehenden Grundsätze im Gleichgewicht, wenn sie in ihrer Mitte aufgehängt ist. Es ist also einerlei, ob wir das Gewicht *A* im Punkte *a* (Fig. 120) aufgehängt haben, oder ob wir im Punkt *a* (Fig. 121) die Mitte der Linie von der Länge 10 (2*m*) mit den 10 kleinen Gewichten aufgehängt haben. Ebenso ist es einerlei, ob wir das Gewicht *B* im Punkt *b* (Fig. 120) aufgehängt haben, oder ob wir im Punkt *b* (Fig. 121) die Linie von der Länge 6 (2*n*) mit den 6 kleinen Gewichten aufgehängt haben. Hängen sie aber so wie in Fig. 119, so hängen die sämtlichen 16 kleinen Gewichte

Digitized by Google

in den Mitten von 16 aufeinander folgenden gleichen Teilen der Linie. Diese Linie ist natürlich im Gleichgewicht, wenn sie in der Mitte aufgehängt ist, und ihre Mitte ist P. Dann muß aber auch Gleichgewicht vorhanden sein, wenn man in a und b die Gewichte A und B aufhängt, die durch die Linien $2m$ mit kleinen Gewichten und die Linie $2n$ mit kleinen Gewichten ersetzt wurden.

§ 122. Nun ist leicht einzusehen, daß auch ein einarmiger Hebel im Gleichgewicht sein muß, wenn auf ihn zwei Kräfte M und N nach entgegengesetzter Richtung wirken, die sich umgekehrt verhalten wie ihre Abstände m und n vom Drehpunkt. Wie man ein Gewicht vermittelst einer Rolle nach oben wirken läßt, ist aus der Figur ersichtlich. Denkt man sich ein Gewicht S (Fig. 122), welches so groß wie M ist, in demselben Punkt aufgehängt, in

Fig. 122.



Einarmiger Hebel.

welchem M nach oben zieht, so würden S und M sich das Gleichgewicht halten. Denkt man sich ferner den einarmigen Hebel zu einem zweiarmigen verlängert und am anderen Arm n', der gleich n ist, ein Gewicht R so groß wie N aufgehängt, so sind auch R und N im Gleichgewicht. Da aber S gleich M und R gleich N ist, müssen sich auch S und R wie n zu m oder wie n' zu m verhalten. Also sind auch S und R, die an den Armen m und n' wirken, untereinander im Gleichgewicht. Es sind also alle vier Kräfte M, S, R und N zusammen im Gleichgewicht, ebenso die beiden Kräfte S und R, folglich sind es auch die beiden Kräfte M und N.

§ 123. In jedem Körper gibt es einen Punkt, in bezug auf den die Gewichte sämtlicher Teile des Körpers untereinander im Gleichgewicht sind. Es ist der sogenannte Schwerpunkt des Körpers, und wenn dieser unterstützt ist, so ist der Körper im Gleichgewicht. Ist ein Körper nur in seinem Schwerpunkt unterstützt, so wirkt das gesamte Gewicht des Körpers auf den Unterstützungspunkt (oder den Aufhängungspunkt).

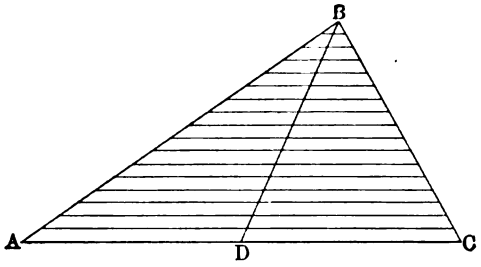
Archimedes hat ein Buch darüber geschrieben, wie man den Schwerpunkt von Flächen verschiedener Form mathematisch ermitteln kann. Wir müssen uns hier mit einer etwas anderen und kürzeren Darstellungsweise begnügen. Denkt man sich ein Dreieck ABC (Fig. 123, a. f. S.) parallel zu einer Seite, z. B. AC, in (unendlich viele) schmale Streifen zerschnitten, so wird jeder Streifen im Gleichgewicht sein, wenn er in der Mitte unterstützt ist. Da nun die Mitten aller Streifen in der Linie AD liegen, die die Ecke B

Digitized by Google

mit der Mitte von AC verbindet, so muß das ganze Dreieck im Gleichgewicht sein, wenn man die Linie BD, die sogenannte Mittellinie, unterstützt. In dieser Linie muß also der Schwerpunkt liegen.

Durch eine ähnliche Betrachtung findet man, daß der Schwerpunkt auch in der Mittellinie AE (Fig. 124) liegen muß. Er liegt also im Durchschnittspunkt O der Mittellinien.

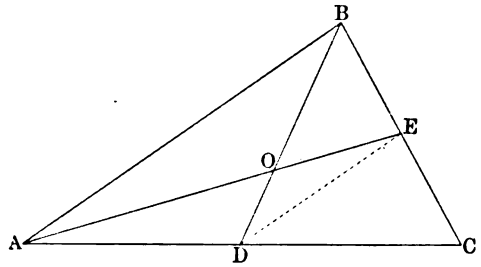
Fig. 123.



Der Schwerpunkt des Dreiecks liegt in der Mittellinie.

Es ist leicht einzusehen, daß die Linie ED gleich der Hälfte von AB ist. Nun ist das Dreieck DOE gewissermaßen das Dreieck BOA im halben Maßstab gezeichnet (die beiden Dreiecke sind ähnlich). Es ist also nicht nur DE gleich der Hälfte von AB, sondern auch OD gleich der Hälfte von OB. Teilt man also eine Mittellinie (BD) in drei gleiche Teile, so ist der der Dreiecksseite am nächsten liegende Teilpunkt, der Durchschnittspunkt der Mittellinien, der Schwerpunkt des Dreiecks.

Fig. 124.



Schwerpunkt des Dreiecks.

§ 124. Man kann nun den Schwerpunkt eines beliebigen Vierecks durch Zeichnung finden. Man teilt das Viereck durch die Diagonale in die beiden Dreiecke ABC und ADC, deren Schwerpunkte T_1 und T_2 (Fig. 125) sind. Der Schwerpunkt des Vierecks muß dann auf der Verbindungslinie der Punkte T_1 und T_2 liegen. Sodann teilt man das Viereck durch die andere Diagonale in die beiden Dreiecke DAB und DCB, deren Schwerpunkte T_3 und T_4 sind. Der Schwerpunkt des Vierecks liegt also auch auf der Verbindungslinie von T_3 und T_4, folglich im Punkt O.

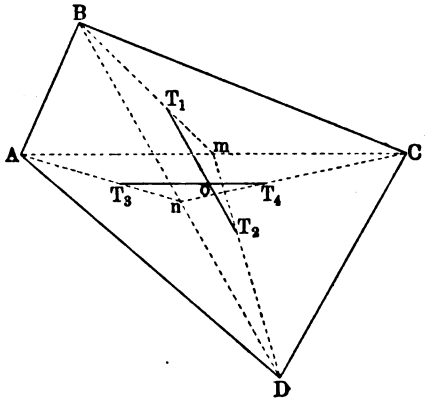
Will man den Schwerpunkt eines Fünfecks durch Zeichnung finden, so teilt man es in ein Dreieck und ein Viereck, ermittelt von jeder dieser beiden Figuren den Schwerpunkt und verbindet die beiden Schwerpunkte. Dann wiederholt man die ganze Zeichnung noch einmal in anderer Weise und erhält eine zweite Verbindungslinie der Schwerpunkte eines Dreiecks und eines Vierecks. Der Schwerpunkt des Fünfecks liegt dann im Durchschnittspunkte der beiden Verbindungslinien.

In ähnlicher Weise läßt sich der Schwerpunkt eines Sechsecks, Siebenecks u. s. w. ermitteln. Das Verfahren ist dagegen nicht bei Figuren anwend-

Digitized by Google

bar, die von krummen Linien begrenzt werden. Archimedes gab jedoch mit seiner gewohnten Meisterschaft auch von verschiedenen krummlinigen Flächen den Schwerpunkt an, worauf wir jedoch nicht näher eingehen wollen.

Fig. 125.



Schwerpunkt des Vierecks.

Beispiel 1. In welcher Linie muß der Schwerpunkt jeder beliebigen Pyramide liegen?

Beispiel 2. Wo muß also der Schwerpunkt einer dreiseitigen Pyramide liegen?

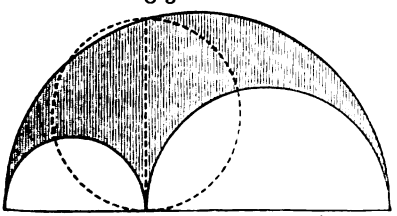
Beispiel 3. Welcher Schluß ergibt sich hieraus für die Lage des Schwerpunktes in einer beliebigen Pyramide?

§ 125. Als die Römer schließlich nachts durch List und Verräterei in die Stadt eingedrungen waren, saß Archimedes in den Morgenstunden in einem anderen Teile der Stadt und zeichnete Figuren in den Sand. Ohne zu ahnen, was geschehen war, saß er vertieft in seine mathematischen Betrachtungen, als ein römischer Soldat auf ihn zueilte und ihn niederschlug, ohne auf seinen Zuruf: „Tritt nicht auf meine Kreise", zu achten[1]). Mar-

[1]) Wer mit Kreisen rechnen kann, mag die folgenden, von arabischen Schriftstellern überlieferten und dem Archimedes zugeschriebenen Sätze vom Kreis beweisen.

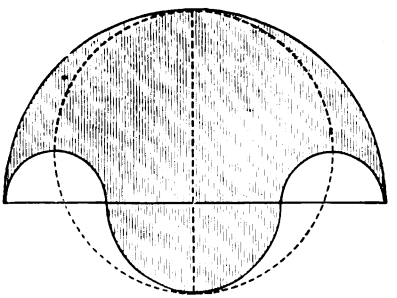
1. Eine Figur (Fig. 126) ist von drei Halbkreisen begrenzt, und zwar so, daß die Summe der Durchmesser der beiden kleineren Halbkreise den Durchmesser des großen Halbkreises bildet. Man beweise, daß die von den Halbkreisen begrenzte (schraffierte) Figur so groß ist wie der Kreis, dessen Durchmesser gleich der im Berührungspunkt der beiden kleineren Kreise errichteten Senkrechten ist.

Fig. 126.



Archimedes' Arbelon.

Fig. 127.



Archimedes' Salinon.

2. Zwei ungleiche Halbkreise mit demselben Zentrum liegen auf entgegengesetzten Seiten eines Durchmessers. Über den überschießenden Stücken des größeren Durchmessers sind zwei Halbkreise gezeichnet, so daß man die von vier Halbkreisen begrenzte (schraffierte) Fig. 127 erhält. Man beweise, daß diese Figur gleich dem (punktierten) Kreise ist, dessen Durchmesser gleich der Summe der Radien der zuerst gezeichneten Halbkreise ist.

Digitized by Google

cellus, der dies beklagte, ließ ihn begraben und erwies seinen Verwandten Ehre. Auf seinem Grabe wurde das Denkmal errichtet, welches er sich selbst gewünscht hatte. Später hat es Cicero mit Dornen überwachsen gefunden, allein die Stelle, welche jetzt als das Grab des Archimedes bezeichnet wird, ist wahrscheinlich nicht die richtige.

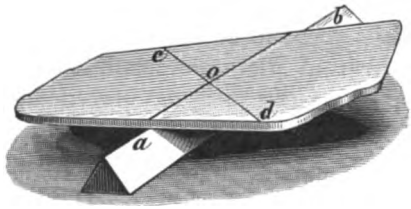
Wir werden später noch einen anderen Teil der Physik kennen lernen, der von Archimedes begründet worden ist (Gleichgewicht schwimmender Körper).

§ 126. An die Lehre vom Schwerpunkt wollen wir sogleich einige neuere Betrachtungen anfügen.

Eine Bestimmung des Schwerpunktes durch den Versuch würde Archimedes ebenso wie Platon mit Geringschätzung betrachtet haben. Und doch kann dies oft sehr praktisch sein, wenn auch zugegeben werden muß, daß man so die Denkarbeit durch ein rein mechanisches Verfahren ersetzt.

Soll der Schwerpunkt einer Fläche bestimmt werden, so kann man sie so auf eine scharfe Kante *ab* legen, daß sie im Gleichgewicht ist, und dann die Kante entlang eine Linie auf der Fläche ziehen. Man wiederholt dasselbe dann in einer anderen Lage der Fläche und erhält so die Linie *cd*. Der Durchschnittspunkt dieser beiden Linien ist der Schwerpunkt der Fläche (Fig. 128).

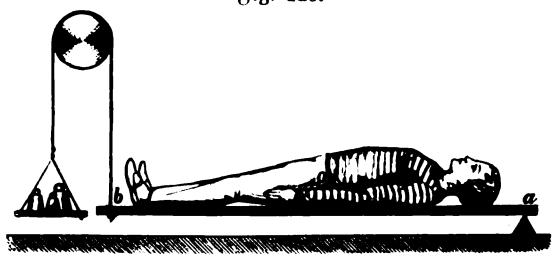
Fig. 128.



Ermittelung des Schwerpunktes durch den Versuch.

Der Schwerpunkt eines beliebigen Körpers läßt sich auch in der durch Fig. 129 veranschaulichten Weise bestimmen. Das eine Ende eines Brettes ruht auf einer Kante, während das andere Ende in der aus der Figur ersichtlichen Weise schwebend gehalten wird. Nachdem der Körper auf das

Fig. 129.



Ermittelung des Schwerpunktes durch den Versuch.

Brett gelegt ist, müssen Gewichte auf die Schale gelegt werden, um das gestörte Gleichgewicht wiederherzustellen. Angenommen, es seien 30 kg erforderlich gewesen. Ist dann außerdem das Gewicht des Gegenstandes und

Digitized by Google

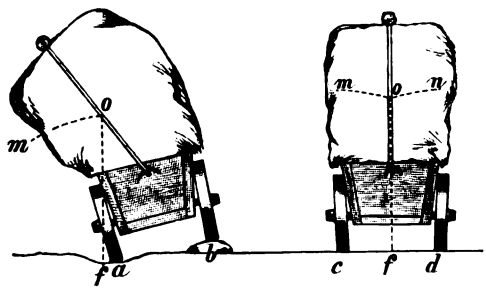
die Entfernung der Punkte *a* und *b* bekannt, so erhält man die Lage des Schwerpunktes durch eine einfache Rechnung. Die Bedingung für das Gleichgewicht ist nämlich die, daß sich das Gewicht des Körpers zu dem im Punkt *b* wirkenden Gewicht verhält wie die Entfernung des Punktes *b* von *a* zu der Entfernung des Schwerpunktes von *a*. Ist z. B. *ab* gleich 2,5 m und das Gewicht des Körpers 75 kg, so ist die Entfernung des Schwerpunktes von *a* gleich 1 m.

Eine andere Art, den Schwerpunkt zu ermitteln, besteht darin, daß man den Körper an einem Seil aufhängt, welches an einem beliebigen Punkt des Körpers befestigt ist. Der Schwerpunkt liegt dann in der Verlängerung des Seils. Hängt man dann den Körper an einem anderen Punkte auf, so erhält man eine zweite Linie, in welcher der Schwerpunkt liegt. Er ist also der Durchschnittspunkt dieser beiden Linien.

§ 127. Ein Körper, der so unterstützt oder aufgehängt ist, daß sein Schwerpunkt nicht sinken kann, ist im Gleichgewicht. Ein Körper dagegen, der sich in einer solchen Lage befindet, daß sich sein Schwerpunkt senken kann, kommt (durch die Schwere) in Bewegung.

Ein Körper, der auf der Unterstützungsfläche *ab* steht (Fig. 130), habe den Schwerpunkt in Punkt *o*. Der Körper wird nach links umfallen, denn bei der Drehung um *a* bewegt sich der Schwerpunkt *o* auf dem Kreisbogen *om*, der bereits im ersten Augenblick (bei *o*) etwas abwärts geht. Dies ist der Fall, wenn der Fußpunkt der vom Schwerpunkt gefällten Vertikalen nicht in die Unterstützungsfläche fällt. Wenn dieser Punkt dagegen in die Unterstützungsfläche *cd* fällt, so bleibt der Körper stehen, denn eine Bewegung des Schwerpunktes kann nur auf den Bogen *om* oder auf dem Bogen *on* stattfinden, und in beiden Fällen müßte der Schwerpunkt zunächst etwas steigen.

Fig. 130.



Bedingung für die Stabilität eines Körpers.

Wenn ein Mensch steht, so sorgt er unwillkürlich dafür, daß die Vertikale vom Schwerpunkt die Unterstützungsfläche trifft, d. h. eine Fläche, die von den Linien begrenzt wird, in denen die äußersten Teile der Fußsohlen den Boden berühren. Je näher der Fußpunkt der Vertikalen vom Schwerpunkt an diese Linien rückt, desto leichter kann man umfallen. Trifft die Vertikale einen Punkt außerhalb der Unterstützungsfläche, so fällt man, wenn man das beginnende Fallen nicht schleunigst, z. B. durch Versetzen des Fußes, hemmt, wie man es fortwährend beim Gehen tut.

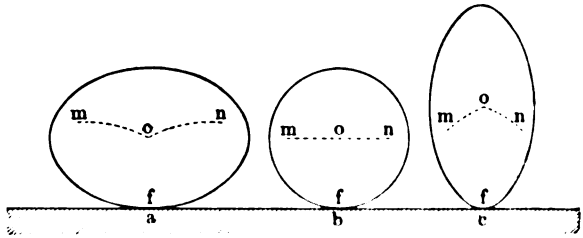
§ 128. Selbst wenn die Unterstützungsfläche zu einem Punkt zusammenschrumpft, ist doch Gleichgewicht vorhanden, wenn dieser Punkt vertikal unter

Digitized by Google

dem Schwerpunkt liegt. Das Gleichgewicht kann allerdings von verschiedener Beschaffenheit sein.

Nimmt man mit einem Körper, der in einem Punkt unterstützt ist, eine wälzende Bewegung vor, so kann der Fall eintreten, daß der Schwerpunkt gehoben wird (Fig. 131, *a*), daß er in derselben horizontalen Linie bleibt (*b*), oder daß er sinkt (*c*). Wenn dann der Körper sich selbst überlassen wird, so

Fig. 131.



Arten des Gleichgewichts bei einem liegenden Körper.

wird er im ersten Falle in die ursprüngliche Gleichgewichtslage zurückkehren, wo der Schwerpunkt seine tiefste Lage hat. Im zweiten Falle ist der Körper auch in der neuen Lage im Gleichgewichte, er wird also in dieser Lage bleiben. Im dritten Falle setzt der Körper seine Bewegung fort, indem sich der Schwerpunkt noch weiter abwärts bewegt. Der erste Körper befindet sich im sogenannten beständigen oder stabilen Gleichgewicht, der zweite im gleichgültigen oder indifferenten, der dritte im unbeständigen oder labilen Gleichgewicht.

Dieselben verschiedenen Fälle können eintreten, wenn ein Körper in einem Punkt *d* (Fig. 132) aufgehängt ist. Je nachdem der Aufhängungspunkt über, in oder unter dem Schwerpunkt liegt, befindet sich der Körper im stabilen, indifferenten oder labilen Gleichgewicht. Denn eine kleine Bewegung des Körpers würde im ersten Falle (d_1) ein Steigen, im dritten (d_3) ein Sinken des Schwerpunktes bewirken, während der Schwerpunkt im zweiten Falle (d_2) seine Lage beibehält.

Fig. 132.

Arten des Gleichgewichts bei einem aufgehängten Körper.

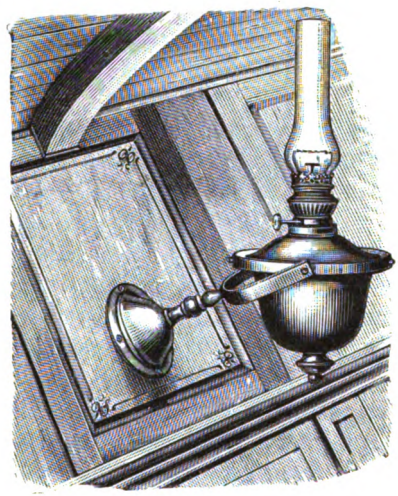
§ 129. Auf dem ersten Fall beruht die sogenannte Cardanische Aufhängung, die man benutzt, um Gegenstände in unveränderter Lage zu erhalten, auch wenn sich die Unterstützung hin und her bewegt (Lampen und Kompasse auf Seeschiffen). Der Schwerpunkt des Körpers liegt tiefer als die horizontale Achse, welche ihn trägt. Die Achse hat ihre Lager in einem

Digitized by Google

Ring, der ſich ſelbſt wieder um eine Achſe dreht, deren Richtung auf der Richtung der erſten Achſe ſenkrecht ſteht (Fig. 133).

Benannt iſt dieſe Art der Aufhängung nach dem italieniſchen Mathematiker und Arzt Cardani (1501 bis 1576). Seine Perſönlichkeit war, wie es zum Teil die damalige Zeit mit ſich brachte, ein wunderliches Gemiſch von Aberglauben und Bekämpfung des Aberglaubens. Er eiferte z. B. gegen Geſpenſter u. dergl., glaubte aber anderſeits, er könne ſich am 1. April 8 Uhr morgens vom Himmel ausbitten, was er wolle, aber nicht zu anderen Zeiten. Er ſoll in dem Jahre, was nach aſtrologiſcher Vorausbeſtimmung ſein Todesjahr ſein ſollte, freiwillig Hungers geſtorben ſein. Ohne auf dem Gebiete der Phyſik eigentlich etwas Großes geleiſtet zu haben, hat er doch bei verſchiedenen Gelegenheiten Geſchick an den Tag gelegt. Er beteiligte ſich an den mathematiſchen Wettkämpfen, die zu ſeiner Zeit, namentlich in Italien, abgehalten wurden und die viel dazu beigetragen haben, die alte griechiſche Geometrie mit der von den Indern begründeten Buchſtabenrechnung zu verſchmelzen [1]).

Fig. 133.



Cardaniſche Aufhängung.

Es gibt zahlreiche Spielereien, bei denen der Schwerpunkt eine Rolle ſpielt. Befeſtigt man an dem einen Ende eines Holundermarkſtäbchens ein Stückchen Blei und legt das Stäbchen auf den Tiſch, ſo richtet es ſich von ſelbſt in die Höhe. Um eine Stopfnadel auf dem Kopf einer Stecknadel „tanzen“ zu laſſen, ſticht man die Stopfnadel vertikal durch einen Korkſtopfen, in den man ſeitlich zwei ſchief nach unten gerichtete Gabeln ſteckt. Der Schwerpunkt des Ganzen liegt dann unter der Spitze der Nadel. Stellt man alſo die Nadel mit der Spitze auf den nicht zu glatten Kopf einer Stecknadel, die man in den Kork einer verkorkten Flaſche geſtochen hat, ſo ſchwebt die Nadel nebſt dem Kork und den Gabeln im ſtabilen Gleichgewicht.

§ 130. Unter denen, die zuerſt in der Renaiſſancezeit die Gleichgewichtslehre des Ariſtoteles wieder aufnahmen, iſt Leonardo da Vinci zu nennen (§ 109). Beſonders verdient machte ſich im 16. Jahrhundert um die Weiterbildung dieſer Lehre Ubaldo del Monte (geb. 1545). Nach-

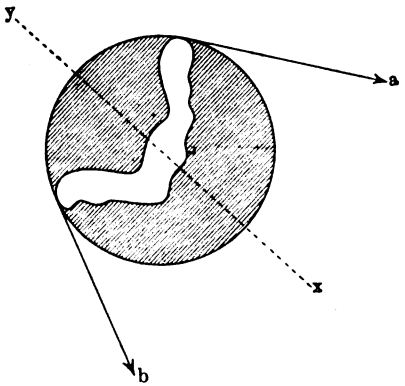
[1]) Die ſog. Cardaniſche Formel für die Auflöſung der Gleichungen 3. Grades iſt jedoch, wie Cardani ſelbſt zugegeben hat, eine Erfindung ſeines Landsmannes Tartaglia (geſt. 1559).

Digitized by Google

dem er seine Universitätsstudien beendet hatte, machte er den Krieg gegen die Türken mit und wurde später Generalinspektor der Festungen in Toskana. Er benutzte seinen Einfluß, um dem jungen Galilei eine gute Stellung zu verschaffen (§ 140), und dieser hat in ihm stets nicht nur einen wohlwollenden Freund, sondern auch einen tüchtigen Physiker verehrt. Del Monte zeigte sich als echter Renaissancemann darin, daß er erst die Gleichgewichtslehre des Archimedes übersetzte und dann eine Mechanik schrieb, in der er die Gleichgewichtslehre weiter entwickelte. Er starb 1607.

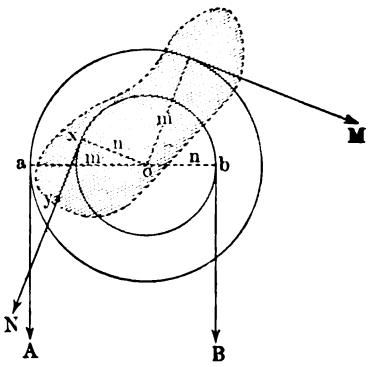
§ 131. Wirken an einem um eine Rolle gelegten Seil zwei Kräfte a und b (Fig. 134), so kann es als etwas Selbstverständliches angesehen werden,

Fig. 134.



Gleichgewicht in Beziehung auf eine Drehungsachse, nach Del Monte.

Fig. 135.



Gleichgewicht ungleicher Kräfte in Beziehung auf eine Drehungsachse, nach Del Monte.

daß sie im Gleichgewicht sind, wenn sie gleich groß sind. Denn in der Figur ist alles in bezug auf die Linie xy symmetrisch, und es ist kein Grund einzusehen, weshalb sich die Scheibe nach der einen Seite drehen sollte und nicht nach der anderen.

Es ist ferner unmittelbar einleuchtend, daß das Gleichgewicht nicht gestört wird, wenn das Seil an der Rolle befestigt wird, auch nicht, wenn man dann die schraffierten Teile der Rolle wegschneidet. Denn solange die Rolle die Gleichgewichtslage nicht verlassen hat, ist es gleichgültig, ob diese Teile vorhanden sind oder nicht.

An einer Doppelrolle mit den Radien m und n (Fig. 135) sind die Kräfte A und B offenbar im Gleichgewicht, wenn sie sich umgekehrt wie die Radien, also wie n zu m verhalten, denn ab kann als ein Hebel betrachtet werden, auf den A und B wirken. Anderseits muß — wie oben angedeutet — eine Kraft N mit der Kraft B im Gleichgewicht sein, wenn N dieselbe Größe wie B hat, und ebenso muß die Kraft M mit A im Gleichgewicht sein, wenn M gleich A ist. Also müssen auch M und N untereinander

Digitized by Google

im Gleichgewicht sein, wenn sie dieselbe Größe wie A und B haben, wenn sie sich also ebenfalls wie n zu m verhalten.

Wenn nun also keine Bewegung stattfindet, weil M und N im Gleichgewicht sind, kann es gleichgültig sein, ob die übrigen Teile der Doppelrolle eine genau kreisförmige Gestalt haben, sie können vielmehr eine beliebige andere Gestalt, z. B. die in Fig. 133 durch Schraffierung angedeutete haben. Die Gleichgewichtsbedingung für die beiden Kräfte M und N muß dieselbe sein, wie auch die übrigen Teile der Rolle, die dabei nicht in Betracht kommen, geformt sein mögen. Es ist nicht einmal erforderlich, daß das Seil, an welchem die Kraft N wirkt, im Punkt x befestigt ist. Es kann ebensogut im Punkt y oder an einer beliebigen anderen Stelle des Seils oder dessen Verlängerung befestigt sein.

Zwei Zug- oder Druckkräfte, die in entgegengesetzter Richtung auf eine Rolle, einen Hebel oder eine andere mechanische Vorrichtung wirken, pflegte man in der damaligen Zeit als Kraft und Last zu unterscheiden. Man benutzte nämlich oft derartige Vorrichtungen, um eine Last durch die Kraft der Hand zu bewegen. Als aber Del Monte und seine Nachfolger das Verhältnis zwischen Kraft und Last erklärten, und zwar in der Regel so, daß sie sich nicht die Last durch die Kraft in Bewegung gesetzt, sondern nur im Gleichgewicht gehalten vorstellten, war es offenbar unwesentlich, welches von beiden man als Kraft und welches als Last bezeichnete. Da man überdies mit dem Worte Last die Vorstellung eines Gewichtes, also eines vertikal nach unten gerichteten Zuges oder Druckes verbindet, und da eine Kraft vermittelst der genannten Vorrichtungen ebensogut mit anders gerichteten Zug- und Druckkräften im Gleichgewicht sein kann, gab man die Unterscheidung von Kraft und Last teilweise auf und sprach von Kräften, die einander das Gleichgewicht halten. Dabei dachte man sich unter Kraft einen Zug oder Druck von bestimmter Größe, der in Pfund angegeben werden kann und der in einer näher bezeichneten Richtung wirkt.

Diese Betrachtungen Del Montes führen zu der folgenden Gleichgewichtsbedingung für zwei Kräfte, die in einer beliebigen Richtung auf einen Hebel (einen Körper) wirken, der um einen festen Punkt (eine Achse) gedreht werden kann.

Man fälle vom Drehpunkt aus Senkrechte auf die Richtung der Kräfte. Wenn sich dann die Kräfte umgekehrt wie diese Senkrechten verhalten und den Körper nach entgegengesetzter Richtung zu drehen streben, dann ist der Körper im Gleichgewicht.

Del Monte führte außerdem eine neue Bezeichnungsweise ein, die in der Klarheit und Übersichtlichkeit einen bedeutenden Fortschritt bezeichnet. Da sich M und N umgekehrt wie m und n verhalten, sind die Produkte $M.m$ und $N.n$ einander gleich. Das Produkt aus der Kraft und ihrem senkrechten Abstand vom Drehpunkt heißt das statische Moment der Kraft. Die Gleichgewichtsbedingung für zwei Kräfte, die auf einen Körper wirken, der sich um eine auf der Ebene der Kräfte senkrecht stehende Achse drehen kann, läßt sich

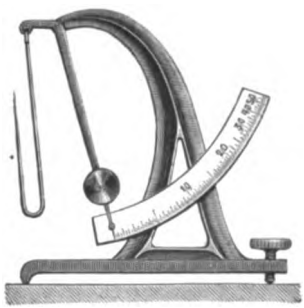
Digitized by Google

also in folgender Weise aussprechen: Die Kräfte müssen den Körper in entgegengesetzter Richtung zu drehen streben und ihre statischen Momente müssen gleich sein.

Der Satz gilt auch, wenn mehr als zwei Kräfte auf den Körper wirken. Man teilt sie dann in zwei Gruppen, so daß die der einen Gruppe den Körper in der einen, die der anderen Gruppe in der entgegengesetzten Richtung zu drehen streben. Dann ist der Körper im Gleichgewicht, wenn die Summe der statischen Momente der einen Gruppe gleich der Summe der statischen Momente der anderen Gruppe ist.

Beispiel 1. Eine Kiste mit gleichförmigem Inhalt wiegt 270 kg. Die drei Kanten derselben sind $a = 80$, $b = 100$ und $c = 120$ cm. Welcher horizontale Druck muß an der oberen Kante wirken, um die Kiste um die Kante a oder um die Kante b umzuwerfen, wenn sie auf der Seite ab steht? Welcher Druck ist erforderlich, um die Kiste um a oder um c umzuwerfen, wenn sie auf ac steht, und welcher Druck, um sie um b oder c umzuwerfen, wenn sie auf bc steht? Antwort: $112\frac{1}{2}$, 90, 162, 108, $102\frac{1}{2}$, $168\frac{3}{4}$ kg.

Fig. 136.



Briefwage.

Beispiel 2. Die Briefwage, Fig. 136.

§ 132. Ein Mann, der ebenfalls die Mechanik in hohem Grade förderte, war ein Zeitgenosse Del Montes, der Holländer Simon Stevens (lat. Stevinus), gewöhnlich Stevin genannt, geb. 1548 in Brügge. Er war erst Buchhalter bei einem Kaufmann in Antwerpen, unternahm dann große Reisen, ward mit 35 Jahren an der Universität Leiden angestellt und starb 1620 als Wasserbauinspektor.

Stevin beschäftigte sich viel mit mechanischen Untersuchungen, und er gehörte zu denjenigen seiner Zeit, die auch in wissenschaftlichen Arbeiten die Muttersprache der lateinischen Sprache vorzogen. An der Weiterentwickelung der Wissenschaften sollten sich nach seiner Ansicht möglichst viele durch Sammeln von Erfahrungen beteiligen, und deshalb sollten die Gelehrten in der von allen verstandenen Muttersprache schreiben, „wie es die Griechen und die Römer selbst getan hatten". Die holländische Sprache, in der er seine Werke abfaßte, eignete sich nach seiner Ansicht wegen der vielen einsilbigen Wörter ganz besonders, um eine Sache klar und bündig auszudrücken. In dieser Sprache ist auch sein Hauptwerk, „De Beginselen der Weegkonst", geschrieben. Seine gesammelten Werke wurden jedoch 1634, also nach seinem Tode, in französischer Sprache herausgegeben.

Etwas anderes, was er eifrig befürwortete, war der Gebrauch des Dezimalsystems in allen Berechnungen, sowie in der Einteilung der Münzen, Maße und Gewichte. Erst jetzt, nach 300 Jahren, hat dieser Gedanke mit der Einführung des Metermaßes, des Grammgewichtes und der Hundertteilung der

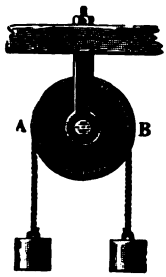
Digitized by Google

meisten Münzen seine Verwirklichung gefunden. Nur England hält merkwürdigerweise noch immer an den alten Einteilungsarten fest.

Als ein Beispiel der Geschicklichkeit Stevins kann angeführt werden, daß er einen Segelwagen konstruierte, der vom Winde getrieben wurde und in dem 28 Personen, darunter Prinz Moritz von Nassau, in zwei Stunden vier holländische Meilen zurücklegten.

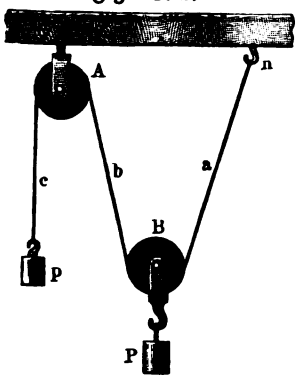
§ 133. Eine zuerst von Stevin angestellte Betrachtung über Rollen hat später große Bedeutung gewonnen. Fig. 137a stellt eine feste Rolle

Fig. 137 a.



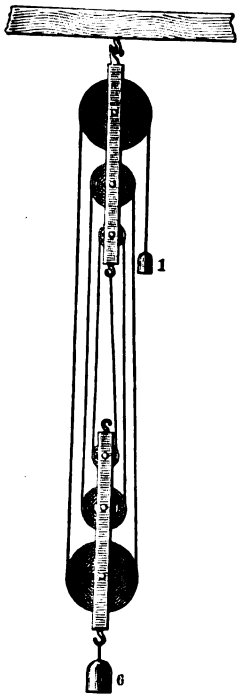
Feste Rolle.

Fig. 137 b.



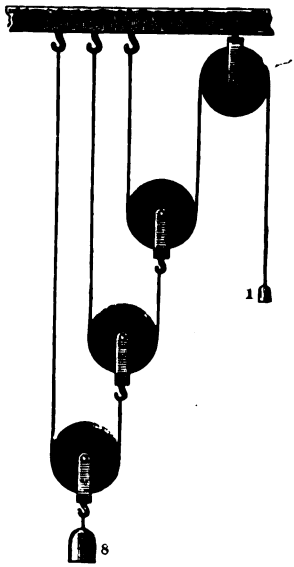
Lose Rolle.

Fig. 137 c.



Flaschenzug.

Fig. 137 d.



Potenzflaschenzug.

vor, d. h. eine solche, deren Achse in einem festen Lager ruht. Die beiden Kräfte sind im Gleichgewicht, wenn sie gleich groß sind, entweder mit Rücksicht auf § 131, oder weil die Rolle als ein zweiarmiger Hebel mit gleichen Armen betrachtet werden kann.

Bei der losen Rolle (Fig. 137b) wirkt die eine Kraft P an einer Gabel, die die Achse der Rolle trägt. Anstatt bei b eine nach oben wirkende Kraft anzubringen, kann man die Schnur um eine feste Rolle gehen und die Kraft nach unten wirken lassen. Die Größe der Kraft wird dadurch nicht verändert. Da sich die Wirkung der Kraft P auf die beiden Teile a und b

Digitized by Google

des Seiles verteilt, wird das Gleichgewicht dadurch hergestellt, daß man an b eine Kraft p wirken läßt, die halb so groß wie P ist.

Fig. 137 c stellt einen Flaschenzug vor. Dieser besteht aus zwei sogenannten Flaschen (Blöcken), deren jede eine Anzahl von Rollen enthält. Die eine dieser Flaschen ist fest, die andere lose. Das Seil ist an der oberen Flasche befestigt und läuft abwechselnd über eine Rolle der unteren und eine Rolle der oberen Flasche.

Die größere Kraft (die Last) wirkt an der losen Flasche, die kleinere Kraft am freien Ende des Seiles. Da sich die Wirkung der Last auf sechs Seile verteilt, so braucht zur Herstellung des Gleichgewichtes am freien Ende des Seiles nur eine Kraft zu wirken, die gleich dem sechsten Teil der Last ist. Allgemein ist die Kraft gleich der Last, dividiert durch die Gesamtzahl der Rollen in beiden Flaschen.

Beim Potenzflaschenzug (Fig. 137 d) ist die Kraft, welche am ersten Seile wirken muß, gleich der Hälfte, die Kraft, welche am zweiten Seile wirken muß, gleich dem vierten Teil, die Kraft, welche am dritten und am vierten Seile wirken muß, gleich dem achten, bezw. dem sechzehnten Teil der Last. Wenn also die Anzahl der Rollen gleich n ist, so ist die Last das 2^nfache von der Kraft. Daher die Bezeichnung „Potenzflaschenzug".

Bezeichnet man die Kraft mit A und die Last mit B, so ist im Falle

a. b. c. d.

$$A = B, \qquad 2A = B, \qquad 6A = B, \qquad 8A = B.$$

Hier macht nun Stevin die folgende Bemerkung. Wenn eine kleine Bewegung stattfindet, wenn z. B. A etwas steigt und B etwas sinkt, oder umgekehrt, so ist nur im Falle a die Bewegung von A ebensogroß wie die Bewegung von B. Im Falle b muß sich A um 2 Zoll bewegen, damit sich B um 1 Zoll bewegt. Im Falle c muß sich A um 6 Zoll bewegen, wenn jedes der sechs hebenden Seile um 1 Zoll verkürzt und also auch B um 1 Zoll bewegt werden soll. Im Falle d muß sich A um 8 Zoll bewegen, damit sich B um 1 Zoll bewegen kann. Bezeichnet man die Bewegungen von A und B mit a und b, so hat man also in den vier Fällen:

$$a = b, \qquad a = 2b, \qquad a = 6b, \qquad a = 8b.$$

Vergleicht man diese Gleichungen mit den vorhergehenden, so ergibt sich der Satz: Sovielmal die eine Kraft größer ist als die andere, sovielmal ist ihre Bewegung kleiner als die der anderen, oder das Produkt aus der einen Kraft und ihrer Bewegung ist gleich dem Produkt aus der anderen Kraft und ihrer Bewegung. Da es sich hier jedoch um Gleichgewicht handelt, ist es zweckmäßiger, von der Möglichkeit einer Bewegung oder einer virtuellen Geschwindigkeit zu sprechen, als von einer wirklichen Bewegung oder einer wirklichen Geschwindigkeit. Dann lautet der Satz folgendermaßen: Eine Kraft ist mit einer anderen im Gleichgewicht, wenn das Produkt aus der einen Kraft und ihrer virtuellen Geschwindigkeit so groß ist, wie das Produkt aus der anderen Kraft und ihrer virtuellen Geschwindigkeit.

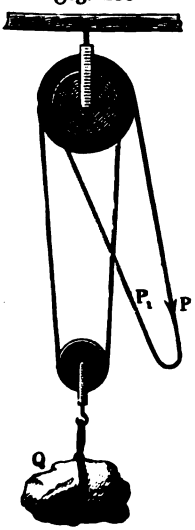
Digitized by Google

§ 134. Dieser wichtige Satz, das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten, wurde in der angegebenen Weise mit Rücksicht auf Rollen und Flaschenzüge zuerst von Stevin ausgesprochen. Sein jüngerer großer Zeitgenosse Galilei gab dem Satze, wie wir sogleich sehen werden, eine erweiterte Gültigkeit, und später hat man gefunden, daß er ganz allgemein für alle möglichen Maschinen gilt.

Beispiel 1. Es ist leicht einzusehen, daß Del Montes Satz von den statischen Momenten ein einzelnes Beispiel dieses Satzes ist.

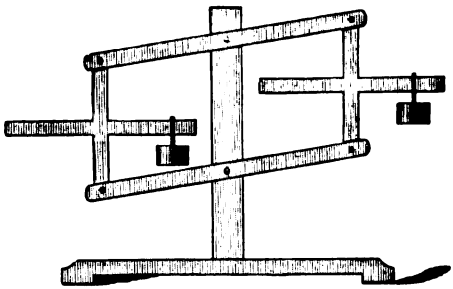
Beispiel 2. Der Satz kann ferner beim Differentialflaschenzug (Fig. 138) angewandt werden. Zwei Rollen mit verschiedenem Durchmesser sind fest miteinander verbunden (oder aus einem Stück gedreht) und drehen

Fig. 138.



Differential-flaschenzug.

Fig. 139.



Robervalsche Wage.

sich um eine gemeinsame Achse mit festem Lager. Eine Kette ohne Ende hängt mit einer Windung über jede dieser beiden Scheiben, die so beschaffen sind, daß die Kette nicht auf den Scheiben gleiten kann.

Die eine der herabhängenden Windungen trägt eine lose Rolle, an deren Achslager die Last hängt. Wirkt eine Kraft (die Hand) so an der Kette, daß sich die Differentialrolle dreht, so zieht die größere Scheibe ein längeres Stück der Kette in die Höhe, als die kleinere Scheibe auf der anderen Seite niederläßt. Ist z. B. der Umfang der großen Scheibe 60 cm, der Umfang der kleinen 55 cm, so werden durch eine Umdrehung der Rolle 60 cm Kette aufgewunden und 55 cm abgewunden. Die tragende Kette wird also um 5 cm verkürzt, und da sie doppelt ist, wird die Last nur um 2,5 cm gehoben. Die Geschwindigkeit der Hand ist also in diesem Beispiel 24 mal so groß als die Geschwindigkeit der Last, folglich muß diese für den Fall des Gleichgewichtes 24 mal so groß sein als jene [1]).

[1]) Wenn die Umfänge der beiden Scheiben O und o sind, so wird der tragende Teil der Kette bei einer Umdrehung um $O - o$ verkürzt, also die Last um $\frac{O-o}{2}$ gehoben. Es ist also $A \cdot O = B \cdot \frac{O-o}{2}$. Daher der Name Differentialflaschenzug.

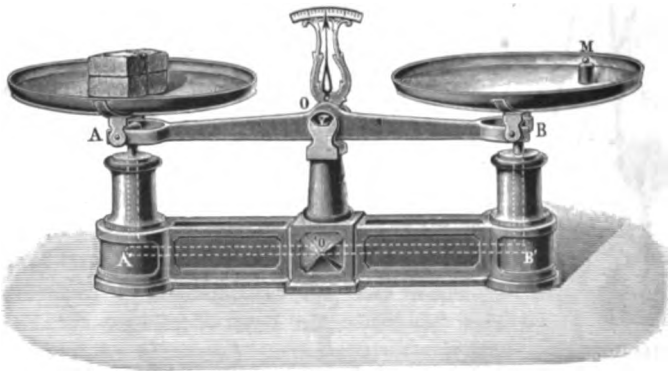
Digitized by Google

Eine eigentümliche Anwendung desselben Satzes ist die Robervalsche Wage (Fig. 139, a. v. S.). Roberval (1602 bis 1675) war ein tüchtiger Mathematiker, der sich an den mathematischen Wettkämpfen seiner Zeit eifrig beteiligte. Er war Mitglied der Pariser Akademie seit deren Stiftung im Jahre 1665.

Zwei gleich lange zweiarmige Hebel drehen sich um Zapfen an einem vertikalen Stativ. Sie sind in der aus der Figur ersichtlichen Weise durch vier weitere Zapfen mit zwei gleich großen Kreuzen verbunden. Der eine Arm eines jeden Kreuzes befindet sich also in vertikaler, der andere in horizontaler Stellung. Wenn sich die beiden Hebel drehen, so behalten die beiden Arme der Kreuze ihre Richtung bei, so daß sich jeder Punkt in dem einen um ebensoviel nach oben bewegt wie ein Punkt im anderen nach unten. Zwei gleich große Gewichte werden sich daher das Gleichgewicht halten, einerlei wo sie an dem Kreuz angebracht sind.

Hierauf beruht die Tafelwage (Fig. 140). Die Schalen werden von vertikalen Stäben getragen, die die Endpunkte des eigentlichen Wagebalkens AB mit dem im Fuß der Wage befindlichen Balken $A'B'$ verbinden.

Fig. 140.



Tafelwage.

§ 135. Das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten ist leicht zu verstehen, wenn man sich die beiden Kräfte als zwei Gewichte vorstellt, von denen das eine A und das andere B Kilogramm wiegt und von denen sich das erstere a Zentimeter aufwärts und das letztere b Zentimeter abwärts bewegt. Dann wird man es ganz natürlich finden, daß keine Bewegung stattfindet, daß also Gleichgewicht vorhanden ist, wenn die Bewegung von jedem Kilogramm um ein Zentimeter abwärts von der Bewegung eines Kilogramms um ein Zentimeter aufwärts begleitet ist. Dies ist aber der Fall, wenn $A.a = B.b$.

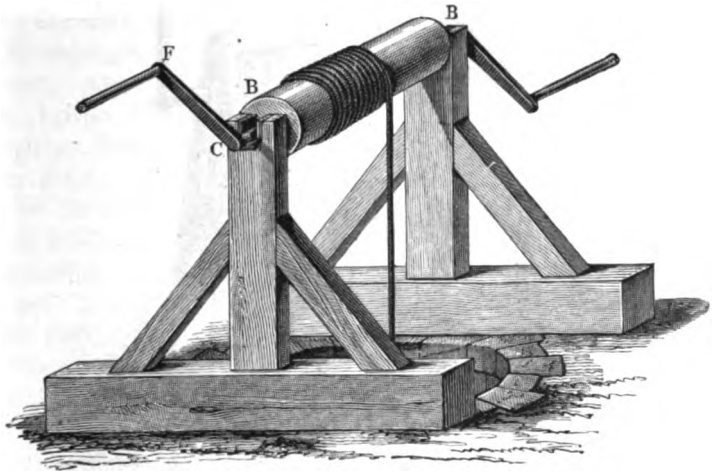
Wenn z. B. die Bewegung von 12 kg um 7 cm abwärts bewirken würde, daß sich 14 kg um 6 cm aufwärts bewegen, so würde Gleichgewicht vorhanden sein, weil 12.7 gleich 14.6 ist.

Digitized by Google

Beispiel 1. Die beiden Durchmesser einer Differentialrolle sind 28 cm und 27 cm. Das Wievielfache ist die Last von der Kraft?

Beispiel 2. Die Winde (Fig. 141). An jedem der beiden Kurbelarme dreht ein Mann. Der Eimer, welcher in die Höhe gewunden wird, wiegt

Fig. 141.



Einfache Winde.

45 kg. Der Durchmesser der Welle ist 20 cm, der Kurbelarm CF ist 42 cm lang. Welchen Druck muß jede der beiden Personen am Kurbelgriff ausüben?

Beispiel 3. Die Winde mit Vorgelege (Fig. 142, a. f. S.). An jeder der beiden Kurbeln wirkt eine Hand mit einem Druck von 12 kg. Die Länge der Kurbelarme ist 40 cm, der Durchmesser der Welle 22 cm. Das kleine Zahnrad (der Trieb) hat 12, das Rad an der Welle 72 Zähne. Wie stark zieht das Seil?

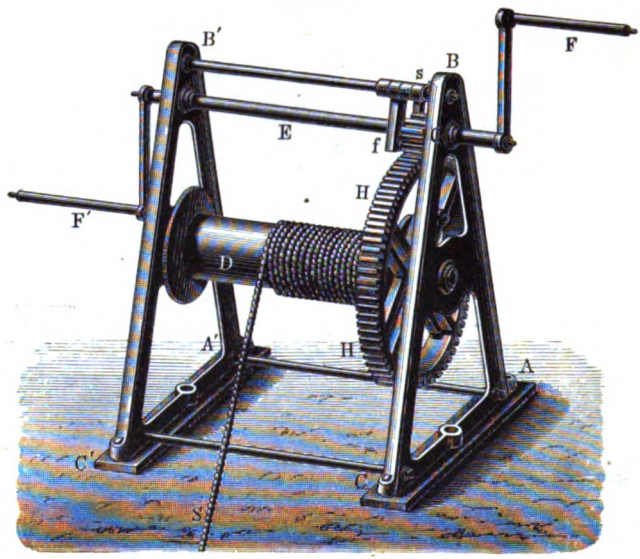
Beispiel 4. Mit Riemen und Riemenscheiben wird sehr oft eine Bewegung von einer Achse auf eine andere Achse in größerer oder kleinerer Entfernung übertragen. Ein Riemen „ohne Ende" ist so um die beiden Scheiben gelegt, daß er von diesen nicht abgleiten kann. Wenn die eine Achse z. B. von einer Dampfmaschine gedreht wird, so muß sich die zweite Scheibe ebenfalls drehen, indem der Rand derselben ebenso schnell wie der Rand der ersten Scheibe laufen muß. — Die Durchmesser zweier Riemenscheiben sind 140 cm und 21 cm. Die erste wird von einer Kurbel von 25 cm mit einem Druck von 25 kg getrieben. Auf der zweiten Achse sitzt eine Scheibe von 60 cm Durchmesser. Welcher Druck auf dem Rande dieser Scheibe kann das Gleichgewicht halten?

Beispiel 5. Wenn eine Schraube vermittelst eines Schraubenschlüssels oder eines Hebels einmal herumgedreht wird, so schiebt sie sich in der Hohl-

Digitized by Google

ſchraube oder Schraubenmutter in der Längsrichtung der Schraube um ein kleines Stück fort, welches die Ganghöhe der Schraube genannt wird. Wenn nun die Länge des Hebels auf jeder Seite der Achſe 17,5 cm iſt, und wenn

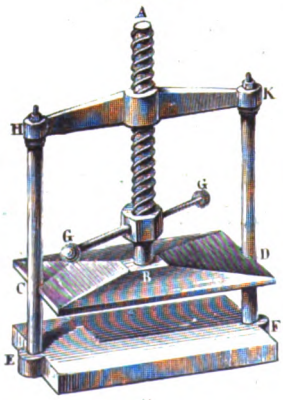
Fig. 142.



Winde mit Vorgelege.

man an jedem Ende (mit jeder Hand) einen Druck von 15 kg ausübt, wenn ferner die Ganghöhe der Schraube 2,5 mm iſt, wie groß iſt dann der Druck, den die Schraube ausübt? (Der Reibungswiderſtand ſoll nicht berückſichtigt werden.)

Fig. 143.



Schraubenpreſſe.

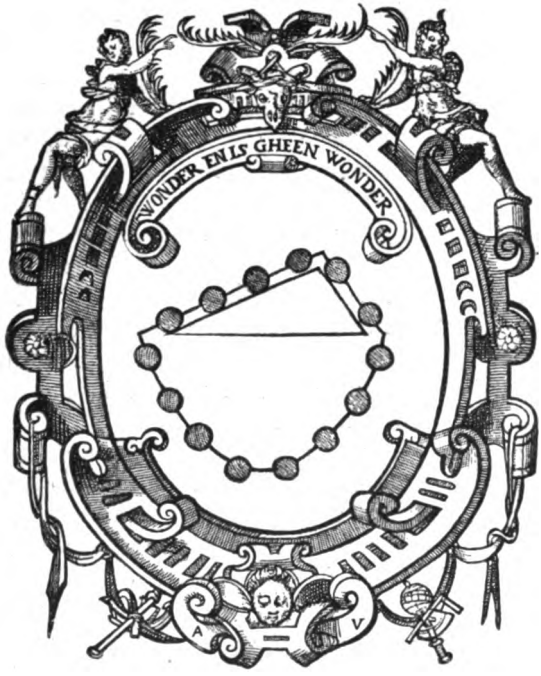
Beiſpiel 6. Bei einer Schraube ohne Ende (Fig. 116 auf S. 131) iſt der Kurbelarm 22,5 cm lang. Das Zahnrad hat 60 Zähne, der Durchmeſſer der Welle, auf der das Zahnrad ſitzt, iſt 15 cm. Das Wievielfache iſt die Laſt von der Kraft?

§ 136. Wenn ein Körper auf einer ſchiefen Ebene ohne Widerſtand hinabrollen oder hinabgleiten kann, ſo iſt die Kraft, welche gerade hinreichend iſt, um das Hinabgleiten zu verhindern (alſo um den Körper im Gleichgewicht zu halten), offenbar kleiner als das Gewicht des Körpers. Die Größe dieſer Kraft fand Stevin in einer originellen Weiſe, auf die er ſelbſt großes Gewicht legte, indem das Titelblatt eines ſeiner Bücher das in Fig. 144 wiedergegebene Bild trägt.

Digitized by Google

Eine gleichförmige Kette, die um ein dreiseitiges Prisma mit horizontaler Unterseite herumgelegt ist, so daß sie also auf zwei schiefen Ebenen liegt, und die in einem Bogen unter der Unterseite des Prismas hängt, ist offenbar im Gleichgewicht. Sie wird nicht von selbst anfangen, auf der einen oder der anderen schiefen Ebene hinabzugleiten. Derjenige Teil der Kette, welcher unter der Grundfläche hängt, ist selbstverständlich symmetrisch und übt daher auf die beiden Teile der Kette, die auf den schiefen Ebenen liegen, einen gleich großen Zug aus. Daher würden die letzteren Teile der Kette auch im Gleichgewicht sein, wenn der schwebende Teil gar nicht da wäre. Nun verhalten sich aber die Gewichte der beiden Kettenstücke wie ihre Längen, also wie die Längen der beiden schiefen Ebenen. Ob die Teile der Kette nun wirklich die gewöhnliche Form von Kettengliedern haben, oder ob es Kugeln von gleichem Gewicht sind, die durch Schnüre verbunden sind, ist gleichgültig. Wir kommen daher durch diesen Gedankengang zu dem folgenden Satz:

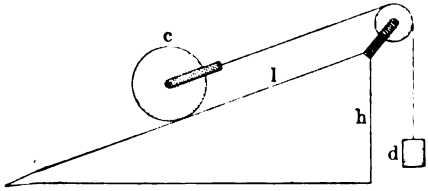
Fig. 144.



Stevins Titelbild („Wunder und ist kein Wunder").

Zwei durch eine Schnur miteinander verbundene Körper auf zwei schiefen Ebenen halten einander das Gleichgewicht, wenn sich ihre Gewichte wie die Längen der schiefen Ebenen verhalten. Ist die eine schiefe Ebene lotrecht (Fig. 145), so hängt der eine Körper *d* frei und wirkt mit seinem ganzen Gewicht, und die Länge dieser schiefen Ebene *h* wird dann die sogenannte Höhe der anderen schiefen Ebene *l*. Der Satz lautet dann so: **Ein Körper (*c*) auf einer schiefen Ebene wird im**

Fig. 145.



Gleichgewicht auf der schiefen Ebene.

Digitized by Google

Gleichgewicht gehalten durch eine Kraft (d), die in der Richtung der schiefen Ebene wirkt und die sich zum Gewicht des Körpers verhält wie die Höhe (h) zur Länge (c) der schiefen Ebene.

§ 137. Dieser Satz ist nicht ohne weiteres im Einklang mit dem Gesetz, daß die Produkte aus der Kraft und der virtuellen Geschwindigkeit in den beiden Richtungen gleich groß sein müssen (§ 133); c und d (Fig. 145) legen offenbar gleich große Wege zurück, ohne gleich groß zu sein, allein Galilei (§ 138 ff.) macht hierüber folgende Bemerkung: Wenn sich c die schiefe Ebene hinauf oder hinab bewegt, so muß man nicht die Länge der schiefen Ebene als den Weg rechnen, um den sich der Körper aus seiner Lage entfernt hat, weil die Schwere, die auf ihn wirkt, ihn eigentlich in vertikaler Richtung nach unten zieht. Während nämlich d z. B. um die Strecke l sinkt, wird c nur um ein Stück so groß wie die Höhe h der schiefen Ebene gehoben, und es stimmt also doch, daß $c.h$ gleich $d.l$ ist.

Der Satz, daß die Produkte aus der Kraft und der virtuellen Geschwindigkeit gleich sind, ist also so zu verstehen, daß die Geschwindigkeiten nicht in der Richtung der Bewegung, sondern in der Richtung der wirkenden Kraft gemessen werden müssen.

Eine Walze von 300 kg wird eine Böschung von 6 m Länge hinaufgezogen und kommt dabei 0,5 m höher. Wie groß ist die Kraft, die auf die Achse in der Richtung der schiefen Ebene wirken muß?

§ 138. Der eigentliche Begründer der neueren Naturforschung ist Galileo Galilei. Er war in Pisa an demselben Tage, dem 18. Februar 1564, geboren, an dem Michelangelo in Rom starb. Er entstammte einem alten Adelsgeschlecht. Sein Vater, der „reich an Kindern, aber arm an Geld" war, hatte ihn ursprünglich zum Kaufmann bestimmt. Allein der Sohn machte in der Lateinschule so gute Fortschritte, daß der Vater beschloß, ihn die Universität besuchen zu lassen, damit er Medizin studiere. Im Jahre 1583 beobachtete er eines Tages im Dom zu Pisa, daß zwei Kronleuchter von ungleicher Größe, die an gleich langen Schnüren hingen, in Schwingung geraten waren und daß sie in gleichem Takte schwangen. Beim Nachdenken über diese Erscheinung fand er, daß sie mit den Schriften des Aristoteles in Widerspruch stand. Wenn sich nämlich der Kronleuchter am weitesten aus der Gleichgewichtslage entfernt hat, so bewegt er sich durch eine Art Fall-

Fig. 146.

Galilei.

Digitized by Google

bewegung (zwar nicht vertikal, aber doch abwärts) in die Gleichgewichtslage zurück. Er kommt hier mit einer gewissen Geschwindigkeit an, geht infolgedessen über die Gleichgewichtslage hinaus, kommt dann wieder zurück u. s. w. Galilei erkannte nun, daß das Fallbestreben für die beiden ungleich großen

Fig. 147.

Der neunzehnjährige Galilei, die Schwingungen der Kronleuchter im Dom zu Pisa beobachtend (nach einem Gemälde in der Tribuna di Galilei in Florenz).

Kronleuchter gleich groß sein muß, da beide gleich schnell schwingen und also die Fallbewegung in derselben Zeit ausführen. Aristoteles dagegen lehrt, daß ein Gegenstand von doppelter Schwere mit der doppelten Geschwindigkeit fällt.

Digitized by Google

Galilei studiert den Fall auf der schiefen Ebene. Er selbst steht in der Mitte hinter dieser. Ein kniender Mönch beobachtet die Zeit durch Zählen der Pulsschläge. Links studieren einige den Aristoteles, rechts sitzt der Sohn des Großherzogs (nach einem Gemälde in der Tribuna di Galilei).

Digitized by Google

§ 139. Galilei fand das letztere jedoch sehr unwahrscheinlich: „Wenn ein Pferd in der Stunde drei Meilen laufen kann, und ein anderes ebenfalls, so werden sie doch nicht sechs Meilen laufen können, wenn man sie zusammenbindet; und wenn ein Pfundgewicht 16 Fuß in einer Sekunde fällt und ein zweites Pfundgewicht ebenfalls, so werden die beiden Gewichte doch nicht doppelt so schnell fallen können, wenn man sie miteinander verbindet, so daß sie zusammen ein Zweipfundgewicht bilden." Der Beweis ist so schlagend, daß man sich nur darüber wundern muß, daß man dies früher nicht eingesehen hatte. — Allein der zweitausendjährigen Autorität des Aristoteles gegenüber konnte sich der junge Mann mit bloßen Gedankenschlüssen nicht begnügen. Er mußte Versuche machen, die am schiefen Turm in Pisa besonders leicht auszuführen waren (er ist im Hintergrund der Fig. 148 sichtbar). Er ließ Körper von verschiedenem Gewicht von dem Turm herabfallen und fand, daß alle Körper gleich schnell fallen, wenn ihre Oberfläche nicht im Vergleich zu ihrem Gewicht sehr groß ist, so daß sich der Widerstand der Luft gegen das Fallen bemerkbar macht.

Hat der Körper dagegen im Vergleich zu seinem Gewicht eine große Oberfläche (Federn, Papier u. dergl.), so fällt er langsamer. Dasselbe gilt von fein verteilten Körpern aus schwereren Stoffen, z. B. Feilspänen, denn auch hier ist die Oberfläche im Vergleich zum Gewicht groß. Wenn nämlich der Durchmesser einer Bleikugel $^1/_{10}$ des Durchmessers einer anderen Bleikugel ist, so ist ihre Oberfläche $^1/_{100}$ von der Oberfläche und ihr Gewicht $^1/_{1000}$ vom Gewicht der anderen Kugel. Das kleine Gewicht wird also 100 mal weniger gehindert als das große Gewicht, aber doch 10 mal mehr als jedes Tausendstel des letzteren.

Daß ein Stück Blei und eine Feder im luftleeren Raume wirklich gleich schnell fallen, wurde später bewiesen, nachdem die Luftpumpe erfunden worden war. Der Beweis läßt sich auch durch den folgenden sehr einfachen Versuch führen. Auf eine horizontal gehaltene große Münze lege man ein Stück Papier, welches kleiner als die Münze ist, und lasse die Münze nebst dem Papier fallen. Dann kommt das Papier ebenso schnell auf die Erde wie die Münze, da es keinen Luftwiderstand zu überwinden hat. Natürlich muß man dafür sorgen, daß die Münze in horizontaler Lage fällt, damit nicht die Luft zwischen sie und das Papier eindringt.

§ 140. Diese Versuche Galileis am schiefen Turm zu Pisa bilden die Vorläufer zahlreicher anderer Versuche, durch die Galilei die Bewegungslehre begründete und sozusagen den Versuch in die Naturforschung einführte. Gewiß sind auch früher schon bei einzelnen Gelegenheiten Versuche angestellt worden, z. B. von Ptolemäus über die Lichtbrechung und von Aristoteles über das Gewicht einer Blase, allein die Begründung der eigentlichen Experimentierkunst, der Kunst, die Natur sozusagen durch systematisches Experimentieren zu verhören, ist eines der großen Verdienste Galileis. Die Versuche am schiefen Turm zu Pisa haben den Anstoß zur Ausbildung ähnlicher Methoden gegeben,

Digitized by Google

durch die der Zuſammenhang der Naturerſcheinungen immer mehr aufgeklärt worden iſt.

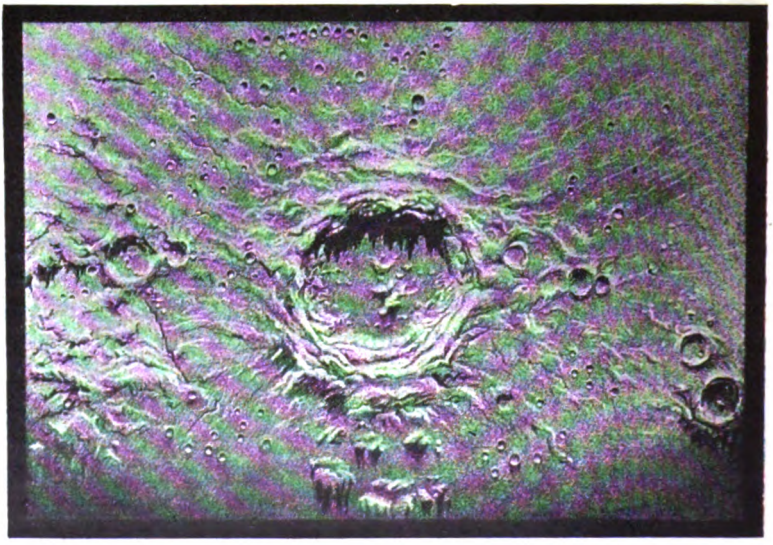
Daß ſich der junge Mann etwas darauf einbildete, bei Ariſtoteles Fehler gefunden zu haben, iſt ganz natürlich, allein bei ſeinen Kameraden, mit denen er viel über dieſe Dinge redete, fand er kein Verſtändnis für ſeine Ideen. Er veröffentlichte über dieſelben nicht eher etwas, als bis er 25 Jahre alt geworden und auf Del Montes Empfehlung (§ 130) eine Stelle als Lehrer der Mathematik in Piſa erhalten hatte.

Galileis durchaus begründete Kritik des Ariſtoteles fand ſelbſtverſtändlich vielfach Zuſtimmung, verſchaffte ihm aber auch viele Gegner, hauptſächlich deshalb, weil er die Autorität des Ariſtoteles erſchüttert hatte. Seine Gegner benutzten auch den Umſtand, daß Galilei (übrigens mit vollem Recht) eine vom Sohn des Großherzogs Coſimo I. erfundene Baggermaſchine kritiſiert hatte. Man bereitete ihm ſo viele Unannehmlichkeiten, daß er ſchließlich ſein Amt niederlegte. Glücklicherweiſe erlitt hierdurch ſeine Laufbahn keine Unterbrechung, denn Del Monte und ein venetianiſcher Freund namens Sagredo verſchafften ihm eine Stelle als Lehrer an der Univerſität in Padua, das damals zur Republik Venedig

Fig. 149.

Jupiter und ſeine Trabanten.

Fig. 150.



Mondlandſchaft mit dem Krater Kopernikus.

gehörte. Hier führte er im Alter von 27 Jahren die Arbeiten aus, welche die Grundlage der Bewegungslehre bilden und von denen ſpäter noch die

Digitized by Google

Rede sein wird. Außerdem hielt er ausgezeichnete Vorlesungen vor einem zahlreichen Zuhörerkreis, zu dem auch der spätere König Gustav Adolf von Schweden gehörte.

Im Jahre 1609 hörte Galilei von der Erfindung des holländischen Fernrohres (§ 130), und sofort machte er sich daran, ein solches zu verfertigen. Das fertige Instrument sandte er seiner Regierung in Venedig. Es zeigte sich, daß das Instrument viel besser war, als ein anderes, welches man von Holland bekommen hatte. Die Senatoren, welche von einem Turme die Aussicht über das Adriatische Meer mit dem Fernrohr beobachtet und dabei gefunden hatten, daß man mit demselben eine feindliche Flotte in großer Entfernung bemerken könne, belohnten Galilei durch Verleihung einer lebenslänglichen Pension, die dreimal so hoch als sein Gehalt war.

§ 141. Galilei selbst machte einen anderen Gebrauch von dem Fernrohr, indem er mit demselben in kurzer Zeit eine ganze Anzahl wichtiger Entdeckungen am Sternhimmel machte. Als er erst im Besitze eines guten Fernrohres war, waren diese Entdeckungen allerdings leicht zu machen. Trotz des großen Aufsehens, welches sie erregten, und des Interesses, welches sich an sie knüpft, können sie doch nicht als die größte von Galileis Leistungen angesehen werden, es sei denn mit Rücksicht auf die Sorgfalt und die Vollkommenheit, mit der er arbeitete. Beobachtete er doch schon im Jahre 1610 mit einem Fernrohr, welches im Jahre 1637 selbst in Holland noch nicht seinesgleichen hatte, wo man um diese Zeit viele von den Dingen, die Galilei entdeckt hatte, noch nicht beobachten konnte. Die wichtigsten astronomischen Entdeckungen Galileis waren die folgenden.

Fig. 151.

Eine Stelle im Sternbild der Zwillinge, mit bloßem Auge gesehen.

§ 142. Der Planet Jupiter hat vier Monde oder Trabanten, die ihn umkreisen. Da aber ihre Bahnen ungefähr in dieselbe Ebene fallen, in der sich die Erde und Jupiter um die Sonne bewegen, so scheint es, als ob sich die Monde in einer geraden Linie bewegten, und zwar so, daß sie sich abwechselnd nach beiden Seiten hin vom Jupiter entfernen und dann diesem wieder nähern.

Bei der Beobachtung des Mondes fand Galilei, daß dessen Oberfläche mit kraterförmigen Bergen übersäet ist, die teils auf die Ebenen, teils in die Krater hinein schwarze Schatten werfen. Galilei gab sofort an, wie man durch Messung der Schattenlänge bei bekannter Stellung der Sonne die Höhe der Berge berechnen könne.

Die Fixsterne zeigten sich im Fernrohr nicht vergrößert, eher kleiner, schärfer und stärker funkelnd, aber namentlich in bedeutend größerer Anzahl, als bei der Beobachtung mit bloßem Auge. Der weißliche Schimmer der Milchstraße erwies sich durch das Fernrohr gesehen als ein Gewimmel von kleinen Sternen.

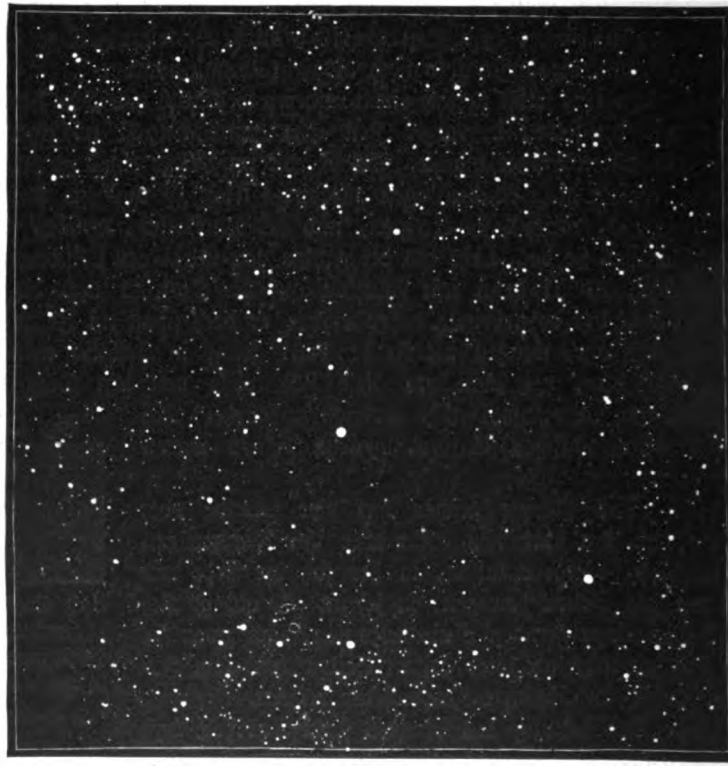
§ 143. Galilei versandte 1610 eine Schrift über diese Entdeckungen, unter anderen auch an Cosimo II., der in seinem Vaterland Toskana Groß-

Digitized by Google

herzog war. Galilei hatte ihm außerdem auch die Ehre erwiesen, die Jupitermonde die mediceischen Sterne zu nennen. Er erhielt denn auch als Antwort eine mit hohem Gehalt ausgestattete Professorstelle in Pisa, die ihn jedoch nicht verpflichtete, in Pisa zu wohnen. Der Großherzog sah ihn im Gegenteil am liebsten bei sich in Florenz.

Im Herbst des genannten Jahres konnte Galilei in seiner neuen behaglichen Stellung seine Entdeckungen am Himmel fortsetzen.

Fig. 152.



Dieselbe Stelle des Himmels wie in Fig. 151, durch das Fernrohr gesehen.

Er beobachtete jetzt, daß Venus nicht immer eine vollständig beleuchtete Scheibe ist, sondern daß sie je nach ihrer Stellung zur Sonne und zur Erde ebenso wie der Mond Phasen zeigt.

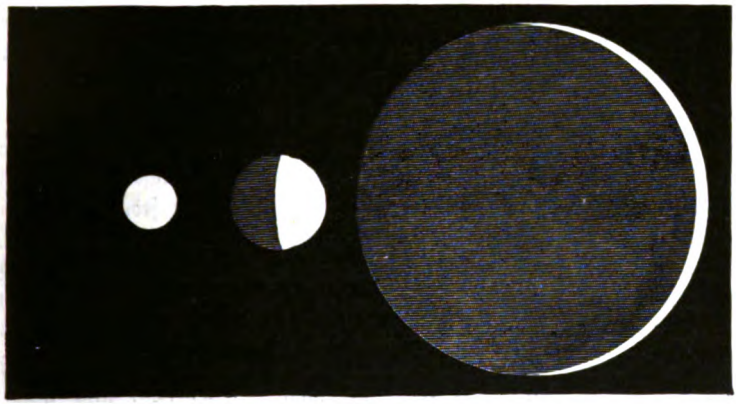
Dieselbe Erscheinung zeigte sich beim Mars. Da dieser jedoch von der Sonne weiter entfernt ist als die Erde, so ist immer der größte Teil der uns zugewendeten Seite beleuchtet, und nur ein kleines Stück derselben ist zuweilen verfinstert.

Ferner beobachtete Galilei etwas Merkwürdiges am Saturn. Es kam

Digitized by Google

ihm vor, als ob „ein Trabant auf jeder Seite den alten Herrn treu unterſtütze und ihn nicht verlaſſe“. Bei einer ſpäteren Gelegenheit waren dieſe Trabanten verſchwunden, und es iſt Galilei nie gelungen, das Rätſel zu löſen.

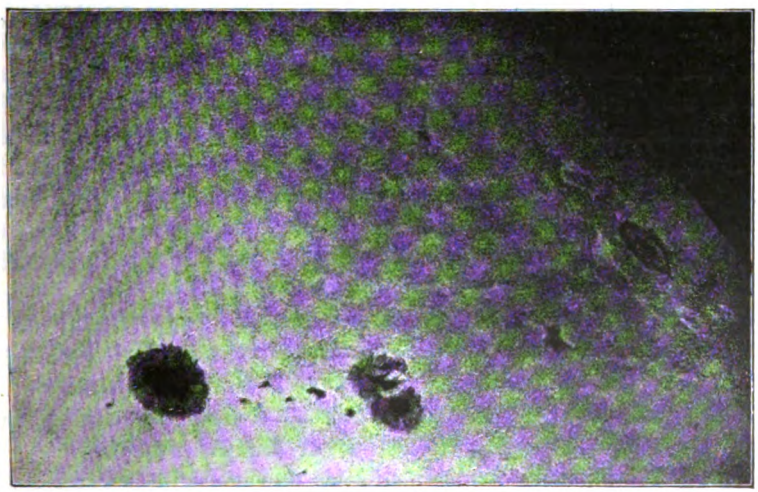
Fig. 153.



Venus hinter, neben und (links) vor der Sonne.

Endlich entdeckte Galilei noch in demſelben Herbſt, daß auf der Oberfläche der Sonne Flecke waren (Fig. 154), und obgleich ſie ſich im Laufe

Fig. 154.



Ein Teil der Sonne mit Sonnenflecken.

der Zeit veränderten und ſchließlich verſchwanden, während andere auftauchten, zog Galilei doch aus ihrer Bewegung den Schluß, daß ſich die Sonne um ihre Achſe dreht.

Digitized by Google

§ 144. Es waren ungefähr 70 Jahre verflossen, seit Kopernikus sein System veröffentlicht hatte. Nur wenige kannten es und wußten seine Bedeutung zu würdigen. Es hatte übrigens auch seine Schwächen (§ 71), allein durch die genannten Entdeckungen fand es in vieler Hinsicht Bestätigung. Die Planeten werden ebenso wie die Erde von der einen Seite beleuchtet, wodurch das Geschwisterverhältnis zwischen beiden wahrscheinlich gemacht wurde. Einige der Planeten hatten wie die Erde Monde. Also auch hier zeigte sich Ähnlichkeit. Ja selbst die Sonne gehörte, wenn auch als ein Glied höherer Art, zur Verwandtschaft, denn sie drehte sich um ihre Achse.

Galilei unterließ es nicht, hierauf aufmerksam zu machen, und es dauerte nicht lange, daß sich angesichts dieser Entdeckungen der Geistlichkeit eine große Unruhe bemächtigte. Die Meinungen waren jedoch geteilt. Mitglieder des Augustinerordens und des Karmeliterordens verteidigten Galilei und waren der Ansicht, daß seine Entdeckungen nicht mit der Bibel in Widerspruch ständen. Der Kardinal Berberini (später Papst Urban VIII.) besang sogar die mediceischen Sterne und die Sonnenflecke.

Um so hitziger waren gewisse andere, namentlich einige Dominikanermönche, welche die Lehre des Kopernikus für ketzerisch und daher auch Galilei als Anhänger dieser Lehre für einen Ketzer erklärten. Seine Entdeckungen seien im Widerspruch mit der Bibel und mit Aristoteles, welcher lehre, daß die Sonne das reinste Feuer sei, so daß sie unmöglich Flecke haben könne. Als Galilei sie aufforderte, selbst die Sonne durch das Fernrohr zu betrachten, weigerten sie sich, sich mit einer solchen verhexten Vorrichtung zu befassen. Galilei beklagt sich in einem Brief an Kepler, der zu derselben Zeit das Kopernikanische System in ganz anderer Weise bestätigt fand: „Was sagst Du zu den ersten Gelehrten der hiesigen Fakultät, denen ich mich tausendmal freiwillig erboten habe, ihnen meine Arbeiten zu zeigen und die mit der hartnäckigen Indolenz einer vollgefressenen Schlange niemals die Planeten oder den Mond oder ein Fernrohr sehen wollen. Diese Leute glauben, die Wissenschaft sei das eine oder andere Buch wie die Aeneide oder die Odyssee, und man brauche die Wahrheit nicht im Weltraum oder in der Natur zu suchen, sondern (ich brauche ihre eigenen Worte) in einer Vergleichung von Texten."

Hier legt Galilei den Finger gerade auf die wunde Stelle, wo eine ernste Operation nötig war. Vor der Zeit Galileis hatte man durch Vergleichung der Bibel mit Aristoteles u. s. w. und durch Spekulationen die Wahrheit finden wollen. Galilei zerbricht die Ketten und sucht die Naturwahrheiten allein dadurch, daß er sich der Natur zuwendet.

Da die Dominikaner fortfuhren zu rasen und zugleich den Papst Paul V. für ihre Auffassung zu gewinnen suchten, fand es Galilei geraten, sich (1615) nach Rom zu begeben. Hier hatte er gute Freunde und er war einige Jahre früher Mitglied der vom Fürsten Cesi gegründeten Akademie geworden, in der er ein von ihm konstruiertes Mikroskop vorgezeigt hatte. Der Papst selbst hörte wohlwollend Galileis Vorstellung an, daß es nicht angehe, etwas zu

Digitized by Google

leugnen, was man mit seinen eigenen Auge sehe. Allein der Papst mußte doch etwas tun und er übergab die Angelegenheit einer Kommission zur Begutachtung. Das Gutachten wurde 1616 abgegeben und fiel für Galilei sehr ungünstig aus. Alle Bücher, welche behaupteten, daß die Bewegung der Erde mit der Bibel nicht in Widerspruch stehe, wurden verboten. Ja selbst in dem 70 Jahre lang geduldeten Buche des Kopernikus mußten alle Stellen, in denen die Bewegung der Erde mit Bibelstellen zusammengestellt wird, ausgemerzt werden.

Dies spornte Galilei zu erneuter Tätigkeit an, und da auch seine Gegner in ihrer Agitation nicht nachließen, sah sich der Papst veranlaßt, die Sache dem Urteil der heiligen Inquisition zu unterbreiten. Das Urteil lautete dahin, daß die Ansicht Galileis über die Bewegung der Erde falsch und ketzerisch sei.

Wenn man nun die Macht det Inquisition und die schrecklichen Strafen kennt, die sie verhängt hat, so ist es nicht zu verwundern, daß sich Galilei nach Arcetri bei Florenz zurückzog, um hier in der Stille zu leben und zu wirken.

§ 145. Als Galilei älter wurde, empfand er das Bedürfnis, der Welt etwas über die Fragen mitzuteilen, für deren Aufklärung er sein Leben lang tätig gewesen war. Er schrieb daher ein Gespräch zwischen drei Personen, Sagredo, Salviati (so hieß einer seiner venetianischen Freunde) und Simplicio. Die beiden ersten sind Anhänger des Kopernikanischen Weltsystems, der letztere ist Anhänger des Ptolemäischen Systems. In ruhigem Tone werden die Gründe, welche sich für das eine und das andere System geltend machen lassen, vorgebracht, aber es ist doch leicht zu verstehen, daß die für das Kopernikanische System sprechenden Gründe die gewichtigsten sind. Galilei begab sich 1630 nach Rom, und mit Hilfe eines Freundes, der Sekretär beim Papst war, gelang es ihm, die Erlaubnis der Zensur zum Drucke des Buches zu bekommen.

Das Buch erschien 1632 in Florenz, und jetzt brach der Sturm mit erneuter Raserei los. Unter den Rasenden befand sich auch ein Professor der Mathematik in Pisa mit Namen Chiaramonti, der eine förmliche Anklageschrift schrieb und sie dem Kardinal Berberini, einem Neffen des Papstes, widmete. Derartige Dinge verfehlten ihre Wirkung nicht. Es gelang den Gegnern Galileis, den Papst Urban VIII. glauben zu machen, daß der gutmütige, aber unwissende Simplicio den Papst selbst vorstellen solle. Die Sache wurde einer von Feinden Galileis gebildeten Kommission, der auch Chiaramonti angehörte, zur Begutachtung vorgelegt. Das Urteil lautete dahin, daß Galilei das Verbot von 1616 [1]) übertreten habe und vor die heilige Inquisition gestellt werden müsse.

[1]) Die Echtheit des Protokolls von 1616, welches besagt, daß sich Galilei verpflichtet habe, die Kopernikanische Lehre aufzugeben, sie nicht mehr zu lehren oder in Schrift und Wort zu verteidigen, ist in neuerer Zeit stark angezweifelt worden. Es existiert über diesen Punkt eine umfangreiche Literatur, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann. Anm. d. Übers.

Digitized by Google

Galilei wurde nach Rom vorgeladen. Der Großherzog Ferdinand II. verwendete sich für ihn unter Hinweis auf sein hohes Alter, aber ohne Erfolg. Galilei mußte 1633 nach Rom reisen, wo er anfangs schonend, später

Fig. 155.

Galilei teilt Torricelli (der sitzende) und Viviani seine Entdeckungen mit (nach einem Gemälde in der Tribuna di Galilei).

dagegen strenger bewacht wurde, bis ihm nach etwa einem halben Jahre, im Laufe dessen er einige Verhöre zu bestehen hatte, das Urteil verkündigt wurde. Er mußte in einer Dominikanerkirche vor den Inquisitoren abschwören, daß sich die Erde bewege. — Daß er unmittelbar darauf gemurmelt haben soll „und sie bewegt sich doch", ist eine später erfundene Anekdote.

Digitized by Google

Außerdem wurde er zu Gefängnis verurteilt, und drei Jahre lang sollte er jede Woche einmal die sieben Bußpsalmen beten.

Die Gefängnisstrafe wurde jedoch alsbald gemildert. Galilei erhielt die Erlaubnis, wieder in Arcetri zu wohnen, doch war es ihm streng verboten, irgend welchen Besuch zu empfangen. Trotz zunehmender Schwäche beschäftigte er sich noch eifrig mit wissenschaftlichen Arbeiten. Im Jahre 1634 gab er seine „Gespräche über eine neue Wissenschaft" heraus, in denen er seine grundlegenden Entdeckungen auf dem Gebiete der Bewegungslehre beschreibt. Als er zuletzt blind und taub geworden war, zeichneten zwei junge Gelehrte, Torricelli und Viviani, mit denen er verkehren durfte, seine Worte auf. In ihren Armen starb er im Jahre 1642. Seine Asche ruht in der Kirche Santa Croce in Florenz unter den übrigen großen Männern Toskanas.

Bewegung.

§ 146. Die Auffindung der einfachsten Gesetze der Bewegung war mit bedeutend größeren Schwierigkeiten verbunden, als die Auffindung der Gesetze des Gleichgewichtes.

Aristoteles machte einen Unterschied zwischen gewaltsamen und natürlichen Bewegungen. Die letzteren mußten kreisrund (Bewegungen am Himmel) oder allenfalls geradlinig sein, nämlich nach dem Mittelpunkt der Erde hin oder von demselben hinweg gerichtet. Hiernach zerfielen die Körper in schwere und leichte.

Derartige Einteilungen können sich systematisch sehr gut ausnehmen und einen recht gelehrten Eindruck machen, aber sie haben durchaus keinen wissenschaftlichen Wert. Um nun die Natur der Bewegung etwas näher zu charakterisieren, sagt Aristoteles, ein Körper könne nur dadurch in gleichförmiger Bewegung erhalten werden, daß fortwährend Kräfte auf ihn wirken, die ihn vorwärts treiben, da er andernfalls seine eigene Bewegungskraft verbraucht und zur Ruhe kommt. Zur Begründung dieser Auffassung können allerdings zahlreiche Erscheinungen des alltäglichen Lebens geltend gemacht werden. Um so schwerer war es für Galilei, zu erkennen, daß das gerade Gegenteil das Richtige ist, denn jeder Körper beharrt in seinem Bewegungszustande (in Ruhe, wenn er in Ruhe ist, in Bewegung mit unveränderter Richtung und Geschwindigkeit, wenn er in Bewegung ist), wenn nicht etwas auf den Körper einwirkt, was diesen Zustand ändert, und dieses etwas, welches den Bewegungszustand des Körpers ändern kann, wird Kraft genannt. Dies ist das Gesetz der Trägheit oder des Beharrungsvermögens.

Daß der Körper in Ruhe bleibt, dürfte wohl kaum bezweifelt werden; daß er aber auch in der Bewegung, die er einmal hat, beharrt, scheint mit der alltäglichen Erfahrung im Widerspruch zu stehen. Galilei zeigte, daß die Ursache, daß eine rollende Kugel zur Ruhe kommt, in gewissen Kräften zu suchen ist, die von Sandkörnern, von Unebenheiten, vom Luftwiderstand u. dergl.

Digitized by Google

ausgeübt werden. Je mehr diese entfernt werden, desto deutlicher tritt das Trägheitsgesetz hervor, z. B. wenn man eine sehr glatte Kugel in einer mit Pergament ausgefütterten Rinne laufen läßt.

§ 147. Galilei fand auch, daß ein Körper seine Bewegung beibehält, selbst wenn eine neue Kraft hinzukommt, die dem Körper eine Bewegung in einer beliebigen Richtung erteilt. Der Körper führt dann gleichzeitig die alte und die neue Bewegung aus, d. h. er kommt an derselben Stelle an, an der er auch ankommen würde, wenn er erst die eine und dann die andere Bewegung machte.

Auch der Umstand, daß eine auf dem Boden rollende Kugel zur Ruhe kommt, kann so aufgefaßt werden, als ob sie ihre Bewegung beibehielte, aber Sandkörner und Unebenheiten ihr durch kleine Stöße eine ebenso große Bewegung in der entgegengesetzten Richtung erteilten.

Beispiele. Ein Kunstreiter, der auf einem laufenden Pferde über eine Barriere springen will, muß senkrecht in die Höhe springen, wenn er wieder an dieselbe Stelle des Pferdes herabkommen will.

Ein Gegenstand, der vom Mast eines segelnden Schiffes herabfällt, trifft die Stelle, welche lotrecht unter dem Punkt liegt, von dem er herabfällt. Während der Zeit, die der Gegenstand zum Herabfallen braucht, kommt das Schiff allerdings ein Stück weiter, aber der Gegenstand, der die Geschwindigkeit des Schiffes hatte, ist in dieser Zeit um ebensoviel weitergekommen. Hiermit war der Einwand entkräftet, der oft gegen die Annahme der Umdrehung der Erde erhoben worden war, nämlich daß einer, der vertikal in die Höhe springt, etwas westlich von der Stelle, an der er sich erhoben hat, wieder herabkommen müsse. — Ebenso fiel ein Bedenken hinweg, welches Tycho Brahe gehabt hatte, daß nämlich ein Stein, der von einem Turm herabfällt, westlich vom Turm auffallen müsse, was aber Tycho Brahe nicht beobachten konnte.

Steht man in einem Wagen, der plötzlich in Bewegung gesetzt oder zum Stehen gebracht wird, so fällt man im ersteren Fall nach hinten, im letzteren nach vorn.

Will man in einem Wagen während der Fahrt einen Ball in die Höhe werfen und wieder auffangen, so muß man ihn vertikal in die Höhe werfen, denn er hat bereits die Geschwindigkeit des Wagens und diese behält er auch während des Steigens und des Fallens bei.

§ 148. Aristoteles wußte wohl, daß ein fallender Körper sich immer schneller und schneller bewegt, aber er glaubte, die Schwerkraft selbst könne den Körper nur in einer Bewegung mit gleichförmiger Geschwindigkeit erhalten. Die erhöhte Geschwindigkeit mußte von etwas anderem herrühren, nämlich von dem Umstande, daß die Luft hinter dem fallenden Körper niederstürzt und diesen stärker vorwärts treibt.

Auch hier findet Galilei das gerade Gegenteil. Wenn der Körper nämlich erst eine gewisse Geschwindigkeit abwärts erreicht hat, ist durchaus keine Kraft erforderlich, um diese Geschwindigkeit zu erhalten, und die ununter-

Digitized by Google

brochen wirkende Schwere wird daher die einmal erreichte Geschwindigkeit stetig vermehren. Was die Luft betrifft, so beschleunigt sie den Fall nicht, sondern im Gegenteil, sie verzögert ihn durch den Widerstand, den sie ausübt.

Es fragt sich nun, ob die Schwere auf einen fallenden Körper ebenso stark wirkt wie auf einen ruhenden. Diese Frage kann jedoch nur durch den Versuch entschieden werden. Versuche mit Körpern, die in schneller Bewegung begriffen sind, sind aber nicht leicht auszuführen. Galilei behandelt daher die Sache zuerst mathematisch. Er legt seinen Berechnungen die Voraussetzung zugrunde, daß die Schwere in jeder Sekunde einem Körper die gleiche Geschwindigkeitsänderung erteilt, einerlei in welchem Bewegungszustande sich der Körper befindet, um dann später zu untersuchen, ob die wirklichen Bewegungen mit den berechneten übereinstimmen.

§ 149. Man denke sich, ein Körper beginne im Augenblicke 0 frei zu fallen, und die Schwere erteile ihm im Laufe einer Sekunde eine gewisse Geschwindigkeit, etwa 32 Fuß. Wenn die Schwere nach Ablauf dieser Sekunde nicht weiter auf den Körper wirkte, so würde er in jeder folgenden Sekunde 32 Fuß zurücklegen.

Während der zweiten Sekunde wirkt aber nach der Voraussetzung, die Galilei machte, die Schwere auf den Körper ebenso stark wie während der ersten Sekunde und vermehrt daher die Geschwindigkeit des Körpers von 32 Fuß (am Anfang der zweiten Sekunde) auf 64 Fuß (am Ende der zweiten Sekunde). Im Laufe der dritten Sekunde müßte dann die Schwere die Geschwindigkeit von 64 Fuß auf 96 Fuß erhöhen u. s. w. Die Geschwindigkeit des Körpers würde also sein:

Beim Beginn der Bewegung	0	Fuß,
Am Ende der ersten Sekunde	32	„
„ „ „ zweiten „	64	„
„ „ „ dritten „	96	„
„ „ „ vierten „	128	„

Die Geschwindigkeit ist in jedem Augenblicke sovielmal 32 Fuß, als der Körper Sekunden gefallen ist [1]).

Fragt man dagegen, wo sich der Körper in den verschiedenen Augenblicken befindet oder wie weit er sich vom Ausgangspunkt entfernt hat, so kann man die folgende Betrachtung anstellen. In der ersten Sekunde hat der Körper alle möglichen Geschwindigkeiten zwischen 0 und 32 Fuß gehabt, und zwar ist die Geschwindigkeit gleichmäßig vom Anfangswert 0 auf den Endwert 32 angewachsen. Man kann annehmen, der Körper habe sich während dieser Sekunde mit der mittleren Geschwindigkeit 16 Fuß bewegt. Dann hat er aber in dieser Sekunde 16 Fuß zurückgelegt. Für die zwei ersten Sekunden ist die mittlere Geschwindigkeit 32 Fuß. Wenn sich aber

[1]) Nennt man die Geschwindigkeit am Ende der ersten Sekunde g, so ist die Geschwindigkeit nach t Sekunden $v = g \cdot t$.

Digitized by Google

ein Körper zwei Sekunden lang mit dieser Geschwindigkeit bewegt, so legt er 64 Fuß zurück. In drei Sekunden wächst die Geschwindigkeit von 0 bis 96 Fuß, die mittlere Geschwindigkeit ist also 48 Fuß, und der Weg, den der Körper in drei Sekunden mit dieser Geschwindigkeit zurücklegt, ist $48.3 = 144$ Fuß. Der Körper fällt also in:

1	Sekunde	16	Fuß oder	$16.1.1$ Fuß
2	Sekunden	64	„ „	$16.2.2$ „
3	„	144	„ „	$16.3.3$ „
4	„	256	„ „	$16.4.4$ „

u. s. w.

Da die mittlere Geschwindigkeit eines fallenden Körpers halb so groß als die Endgeschwindigkeit, also gleich 16 Fuß mal der Anzahl der Sekunden ist, so ist der zurückgelegte Weg gleich 16 Fuß multipliziert mit der zweiten Potenz der Anzahl der Sekunden [1]).

In Fig. 156 stellt die ausgezogene Linie links die in den einzelnen Sekunden zurückgelegten Wege vor, die punktierte Linie die Geschwindigkeiten am Ende der verschiedenen Sekunden, d. h. die Wege, die der Körper in einer Sekunde zurücklegen würde, wenn er die Endgeschwindigkeit der vorhergehenden Sekunde unverändert beibehielte.

Beispiel 1. Ein Stein fällt in drei Sekunden in einen Brunnen hinab. Wie tief ist der Brunnen und mit welcher Geschwindigkeit kommt der Stein auf dem Boden an?

Beispiel 2. Eine aus einem Ballon herabfallende Kugel erreicht die Erde mit einer Geschwindigkeit von 245 m. Aus welcher Höhe ist die Kugel herabgefallen und in welcher Zeit ($g = 9{,}8$ m)?

Beispiel 3. Welche Zeit braucht ein Körper, um eine Höhe von 160 m (Höhe der Türme des Kölner Domes) zu durchfallen?

§ 150. Da ein frei fallender Körper in kleinen Zeiten ziemlich große Geschwindigkeiten erreicht und lange Wege zurücklegt, war es selbst am schiefen Turm zu Pisa nicht leicht, die gefundenen Gesetze auf ihre Richtigkeit zu prüfen. Um eine solche Prüfung zu erleichtern, mußte man in der einen oder anderen Weise eine Kraft schaffen, die auf einen frei fallenden Körper weniger stark wirkt als die Schwere. Galilei erreichte dies durch Versuche über den Fall auf der schiefen Ebene, bei denen er die störenden Einflüsse (Reibungswiderstand) so viel wie möglich dadurch beseitigte, daß er eine Elfenbeinkugel eine mit Pergament ausgekleidete Rinne hinabrollen ließ (Fig. 148 auf S. 154).

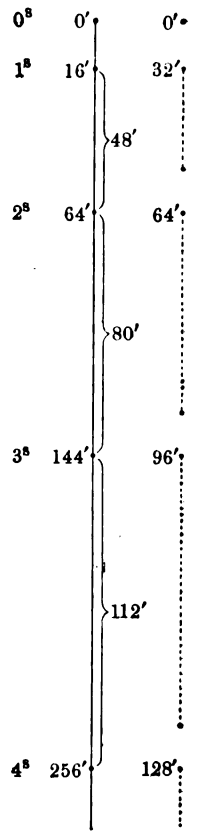
---

[1]) Bezeichnet s die Fallhöhe (den Fallraum) von t Sekunden, so ist $s = g/2\, t^2$. Man hat also die beiden Gleichungen $v = g.t$ und $s = g/2\, t^2$ mit den drei Größen v, t und s (g ist immer gleich 32, genauer $31^5/_8$ Fuß oder 9,8 m). Wenn also zwei von den drei Größen gegeben sind, so läßt sich die dritte berechnen. Eliminiert man aus den beiden Gleichungen t, so erhält man die Gleichung $v^2 = 2gs$.

Digitized by Google

Wenn eine Kugel daran verhindert wird, eine schiefe Ebene herabzufallen, so übt sie, wie Stevin gefunden hatte (§ 136), in der Richtung der schiefen Ebene einen Druck aus, der sich zum Gewicht des Körpers verhält wie die Höhe zur Länge der schiefen Ebene. Wenn also die Höhe 1 und die Länge 8 ist, so wird die Kugel mit einem Achtel ihres eigenen Gewichtes hinabgezogen. Auf die Kugel wirkt also eine Kraft, die gleich dem achten Teil der Schwerkraft ist. Galilei vermutete nun, daß eine derartige kleinere Kraft der Kugel eine entsprechend kleinere Geschwindigkeit in jeder Sekunde erteilen müsse, also in dem genannten Beispiel ein Achtel von 32 Fuß oder 4 Fuß am Ende der ersten Sekunde, 8 Fuß am Ende der zweiten Sekunde u. s. w. nach demselben Gesetz wie beim freien Fall, mit dem einzigen Unterschied, daß die Grundgeschwindigkeit hier nicht 32 Fuß, sondern nur 4 Fuß ist [1]). Der Weg, den ein Körper in einer gewissen Zeit auf der schiefen Ebene zurücklegt, ist ebenso wie beim freien Fall gerade so groß wie der Weg, den er in derselben Zeit mit der mittleren Geschwindigkeit, d. h. mit der Hälfte der Endgeschwindigkeit, zurücklegen würde. Man erhält also auch ein dem zweiten Fallgesetz entsprechendes Gesetz für den Fall auf der schiefen Ebene [2]).

Fig. 156.



Der freie Fall.

Durch derartige Versuche, bei denen man die Bewegung des Körpers bequem beobachten und messen konnte, fand Galilei die Voraussetzung, von der er bei seinen Berechnungen ausgegangen war, bestätigt.

§ 151. Wenn ein Körper mit einer Anfangsgeschwindigkeit von z. B. 128 Fuß vertikal in die Höhe geworfen wird, so erteilt ihm die Schwere in jeder Sekunde eine nach unten gerichtete Geschwindigkeit von 32 Fuß, wodurch seine Geschwindigkeit schließlich bis auf 0 vermindert wird. Seine Geschwindigkeit ist nach

1 Sekunde	128 —	32 =	96 Fuß
2 Sekunden	128 — 2 . 32 =		64 „
3 „	128 — 3 . 32 =		32 „
4 „	128 — 4 . 32 =		0 „

Die Geschwindigkeit des Körpers nimmt also beim Steigen genau in derselben Weise ab, wie sie beim Fallen zunimmt. Die Zeit, welche der

[1]) Für den freien Fall ist $v = g.t$, für den Fall auf der schiefen Ebene von der Steigung 1 : 8 dagegen $v = \frac{1}{8} g.t$.

[2]) Beim freien Fall ist $s = \frac{1}{2} g.t^2$, beim Fall auf der schiefen Ebene mit der Steigung 1 : 8 ist $s = \frac{1}{2} . \frac{1}{8} g.t^2$.

Digitized by Google

Körper zum Steigen braucht, ist dieselbe (im Beispiel 4 Sekunden), die er zum Durchfallen der erreichten Höhe braucht, und die Geschwindigkeit, mit der er wieder unten ankommt, ist gleich der Anfangsgeschwindigkeit, mit der er in die Höhe geworfen wurde. Der fallende Körper passiert jeden Punkt der durchlaufenen Strecke mit derselben Geschwindigkeit wie der steigende, nur in entgegengesetzter Richtung.

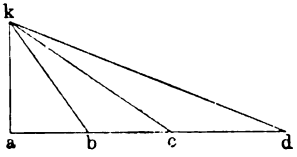
Beispiel 1. Eine Gewehrkugel wird mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 367,5 m vertikal in die Höhe geschossen. Wie lange steigt sie und welche Höhe erreicht sie? Wann und mit welcher Geschwindigkeit kommt sie wieder unten an?

Beispiel 2. Ich werfe einen Ball vertikal in die Höhe und fange ihn nach vier Sekunden wieder auf. Welche Höhe hatte der Ball erreicht und mit welcher Geschwindigkeit kommt er an?

Beispiel 3. Eine Wildgans fliegt vertikal über mir. Eine Büchsenkugel mit der Anfangsgeschwindigkeit 480 m erreicht sie in $^1/_4$ Sekunde. Mit welcher Geschwindigkeit trifft die Kugel die Gans? Wie hoch flog sie und nach welcher Zeit vom Abfeuern des Schusses gerechnet fällt sie auf die Erde? Auf den Luftwiderstand soll keine Rücksicht genommen werden.

§ 152. Auf einer schiefen Ebene von der Neigung 1:8 (§ 150) erlangt die Kugel in acht Sekunden die Geschwindigkeit $4.8 = 32$ Fuß, dieselbe Geschwindigkeit, die ein frei fallender Körper in einer Sekunde erlangt. Die mittlere Geschwindigkeit der Kugel war 16 Fuß, folglich hat sie den Weg $16 \times 8 = 128$ Fuß zurückgelegt. Dieser Weg ist achtmal so lang als der Weg, der beim freien Fall in einer Sekunde zurückgelegt wird. Aber auf einem achtmal so langen Wege kommt der Körper auf der schiefen Ebene nur um die Höhe der schiefen Ebene weiter nach unten. Hieraus ergibt sich der wichtige Satz, daß ein Körper, der eine schiefe Ebene herabrollt, am Fuße derselben mit derselben Geschwindigkeit ankommt, die er erlangt, wenn er die Höhe der schiefen Ebene frei herabfällt. Dies gilt für jede beliebige Neigung, da diese auf die Geschwindigkeit, die der Körper beim Durchfallen der Höhe erlangt, keinen Einfluß hat [1]). Eine von k (Fig. 157) herabfallende Kugel

Fig. 157.



Ein Körper erreicht auf verschiedenen schiefen Ebenen mit gleicher Höhe dieselbe Geschwindigkeit.

[1]) Ist die Höhe einer schiefen Ebene a und die Länge b, so ist das Fallbestreben auf der schiefen Ebene $\frac{a}{b}\,g$. Werden nun die Geschwindigkeiten, die der Körper beim freien Fall die Höhe herab und beim Herabrollen über die Länge der schiefen Ebene, bezw. mit v und V bezeichnet, so ist (§ 149):

$$2ga = v^2 \text{ und } 2\,\frac{a}{b}\,g.b = V^2 \text{ oder } 2ga = V^2, \text{ folglich } v = V.$$

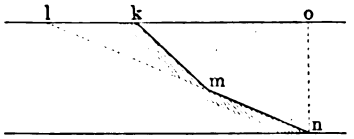
Digitized by Google

kommt im Punkt *b*, im Punkt *c* und im Punkt *d* mit derselben Geschwindigkeit an wie im Punkt *a*.

§ 153. Dasselbe gilt auch, wenn der Körper mehrere schiefe Ebenen von verschiedener Neigung herabrollt. Wenn z. B. eine Kugel die schiefen Ebenen *km* und *mn* (Fig. 158) herabrollt, so kommt sie im Punkt *n* mit derselben Geschwindigkeit an, mit der sie ankommen würde, wenn sie die schiefe Ebene *ln* herabgerollt oder die Höhe *on* herabgefallen wäre.

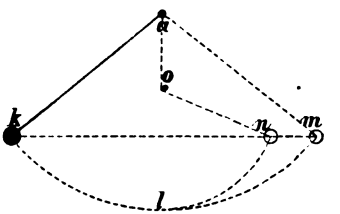
Was für die Bahn *klm*, die einen Knick hat, gilt, gilt auch für eine Bahn, die mehrere Knicke hat, und auch für eine Bahn, die unendlich viele Knicke hat, d. h. für eine gekrümmte Bahn. Hat sich also ein Körper unter dem Einfluß der Schwere abwärts bewegt, so hat er dadurch eine Geschwindigkeit erlangt, die von der Bahn des Körpers vollkommen unabhängig und nur durch den Höhenunterschied zwischen dem Anfangspunkt und dem Endpunkt der durchlaufenen Bahn bedingt ist.

Fig. 158.



Fall auf zwei schiefen Ebenen.

Fig. 159.



Bahn, die von einer schwingenden Kugel beschrieben wird.

Wenn die Bahn des Körpers wieder steigt, so verliert der Körper seine Geschwindigkeit wieder nach und nach, und wenn er wieder die ursprüngliche Höhe erreicht, so ist seine Geschwindigkeit gleich Null, einerlei auf welchem Wege er die Höhe erreicht hat.

Auch diese Reihe von Gedankenschlüssen fand Galilei durch den folgenden Versuch bestätigt. Eine Kugel *k* (Fig. 159) ist vermittelst eines Seiles am Nagel *a* aufgehängt. Wird sie bei *k* losgelassen, so beschreibt sie den Bogen *klm*, und zwar so, daß ihre Geschwindigkeit in dem tiefsten Punkt der Bahn *l* am größten und im Punkt *m*, der auf gleicher Höhe mit *k* liegt, wieder gleich Null ist. Sie schwingt dann zwischen *k* und *m* hin und her, bis sie durch äußere Ursachen (Luftwiderstand) nach und nach zum Stillstehen gebracht wird.

Wird nun im Punkt *o* ein Nagel befestigt und dann die Kugel bei *k* losgelassen, so beschreibt sie die Bahn *kln*. Der Punkt *n* liegt auf gleicher Höhe mit *k* und *m*. Dann durchläuft sie dieselbe Bahn rückwärts und kommt im Punkt *k* an. Die Höhe, welche erreicht wird, ist von der Form der Bahn unabhängig.

§ 154. Eine Vorrichtung wie *ak* (Fig. 159) heißt ein Pendel. Solche Pendel (Kronleuchter) waren es, die im Dom zu Pisa die Aufmerksamkeit des jungen Galilei erweckt hatten. Er studierte die Gesetze der Pendel-

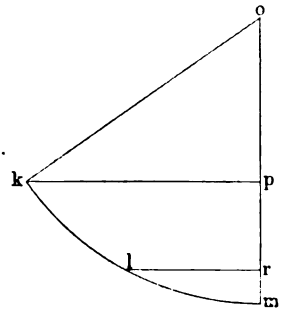
Digitized by Google

bewegung genauer und fand, wie bereits erwähnt, daß die Schwingungszeit des Pendels vom Gewicht desselben unabhängig ist. Die Fallgeschwindigkeit ist für alle Körper gleich groß.

§ 155. Ferner sind die Schwingungszeiten unabhängig von der Größe der Schwingungen. Hiervon kann man sich leicht überzeugen, indem man zwei Kugeln an gleich langen Schnüren aufhängt, die eine nur wenig, die andere dagegen erheblich mehr aus der Ruhelage entfernt und dann beide gleichzeitig losläßt.

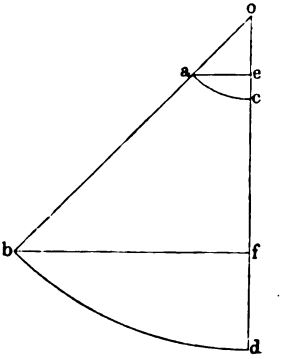
Ist der eine halbe Schwingungsbogen km (Fig. 160) doppelt so groß wie der andere lm, so ist die vertikale Höhe pm ungefähr das Vierfache von

Fig. 160.



Pendel mit verschiedener Schwingungsweite.

Fig. 161.



Verschiedene Pendel mit gleicher Schwingungsweite.

rm. Die Zeit, welche der Körper brauchen würde, um die Höhe pm zu durchfallen, muß also doppelt so groß sein als die Zeit, die der Körper brauchen würde, um die Höhe rm zu durchfallen (§ 149). In der doppelten Zeit erlangt der Körper aber die doppelte Endgeschwindigkeit. Wenn also der Körper von p oder k her in den Punkt m kommt, so kommt er hier mit einer doppelt so großen Geschwindigkeit an, als wenn er von r oder l her in dem Punkt m ankommt. Da nun aber der Weg km doppelt so lang als der Weg lm ist, so braucht der Körper zum Durchlaufen beider Wege dieselbe Zeit.

§ 156. Endlich fand Galilei, daß ein Pendel, welches die doppelte, dreifache, vierfache u. s. w. Schwingungszeit haben soll als ein anderes, viermal, neunmal, sechszehnmal u. s. w. so lang sein muß als dieses. Man kann sich hiervon leicht durch den Versuch überzeugen. Wenn ein Pendel viermal so lang ist als ein anderes, so macht es eine Schwingung, während das andere zwei macht.

Ist ob (Fig. 161) viermal so lang als oa, so ist auch der Bogen bd viermal so lang als ac und die Fallhöhe fd viermal so groß wie ec. Der Körper braucht also zum Durchfallen von fd die doppelte Zeit als zum

Digitized by Google

Durchfallen von *ec*. Wenn er im Punkt *d* von *f* oder *b* her ankommt, hat er also eine doppelt so große Geschwindigkeit, als wenn er von *e* oder *a* her im Punkt *c* ankommt. Legt er aber den Weg *bd* von vierfacher Länge mit der doppelten Geschwindigkeit zurück, so braucht er dazu die doppelte Zeit.

§ 157. Galilei erkannte, daß sich das Pendel vorzüglich eignet, als Zeitmesser zu dienen, und er benutzte es zur Zeitbestimmung bei seinen Versuchen über den Fall auf der schiefen Ebene (§ 150). Er machte den Vorschlag, ein schweres Pendel so mit einem Räderwerk in Verbindung zu setzen, daß es bei jeder Schwingung gegen einen Zahn eines Zahnrades stoßen mußte, so daß durch die Drehung dieses Rades sowie der anderen mit ihm in Verbindung stehenden Räder die Anzahl der Pendelschwingungen und also die Zeit in automatischer Weise angezeigt werden mußte. Derartige Uhrwerke wurden 1649 von seinem Sohn Vincenzo Galilei zur Ausführung gebracht. Sie hatten natürlich den großen Mangel, daß sie nach einiger Zeit, wenn die Pendelschwingungen zu schwach geworden waren, stehen blieben.

Die Uhr.

§ 158. Bedeutend vervollkommnet wurde die Uhr durch Christian Huygens. Die Verbesserung, welche er einführte, bestand darin, daß er das Pendel nicht als bewegende Kraft, sondern nur als Regulator benutzte, während das Uhrwerk durch ein Gewicht in Bewegung gesetzt wird. Bevor wir auf die Arbeiten von Huygens näher eingehen, werfen wir zunächst einen Blick auf die früheren Bestrebungen, das Problem der Zeitmessung zu lösen.

Für geordnete gesellschaftliche Zustände ist die Zeitmessung ebenso notwendig wie die Längenmessung und die Gewichtsmessung, aber sie ist bedeutend schwieriger, weil sie nicht, wie die beiden anderen Messungen, vermittelst eines materiellen Maßes ausgeführt werden kann.

Man nahm zunächst seine Zuflucht zur Stellung der Himmelskörper, namentlich der Sonne, die ohnedies mit der Ordnung des täglichen Lebens eng verknüpft war. Alle gebildeten Völker des Altertums benutzten Sonnenuhren (§ 41). Die Chaldäer teilten den Tag in 12 Stunden. Diese Einteilung wurde unter Alexander dem Großen durch Berosus (ein Priester des Bel, der Geschichte und Astronomie in griechischer Sprache schrieb) in Griechenland eingeführt. Auch die Einteilung der Stunde in 60 Minuten und der Minute in 60 Sekunden ist chaldäischen Ursprungs (§ 11).

Ein anderer Zeitmesser, der ebenfalls bis in die vorhistorische Zeit zurückgeht, ist die Wasseruhr. Sie war bei den Chinesen, den Indern, den Chaldäern und den Ägyptern in Gebrauch, und Cäsar fand sie auch in Britannien. Eine der ältesten Formen war ein trichterförmiges Gefäß mit einer kleinen Öffnung, aus der Wasser langsam ausfloß. Da das Wasser bei hohem Wasserstand schneller ausfließt, als bei tiefem Wasserstand, so wird durch die trichterförmige Gestalt des Gefäßes erreicht, daß die Oberfläche des Wassers am Anfang und gegen Ende der Ausflußzeit einigermaßen gleich

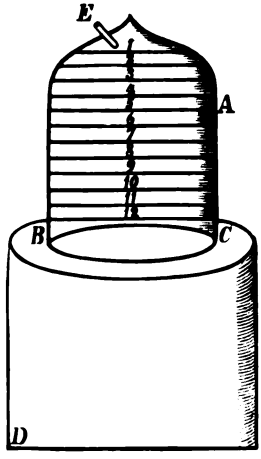
Digitized by Google

schnell sinkt. Auf die Oberfläche des Wassers setzte man zuweilen einen Schwimmer mit einem lotrechten und eingeteilten Stiel, dessen Höhenzahlen man an einer festen Marke ablesen konnte.

Die Inder setzten eine Muschelschale mit einem kleinen Loch im Boden auf die Wasseroberfläche. Das Wasser drang durch das Loch ein, und wenn die Muschel voll Wasser war, sank sie unter und die Stunde war zu Ende.

Della Porta gibt die Beschreibung und Abbildung (Fig. 162) einer Wasseruhr, bestehend aus einer mit Wasser gefüllten Glasglocke AB, die über

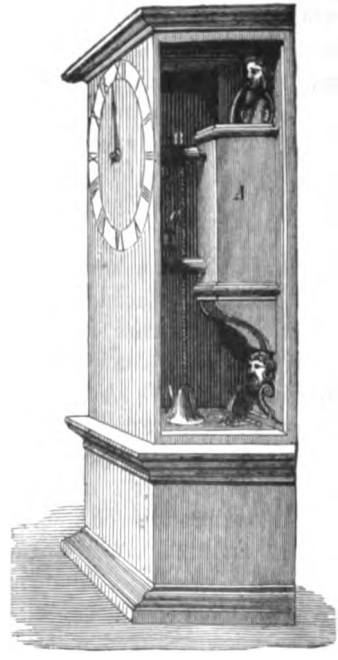
Fig. 162.



Wasseruhr nach Della Porta.

einen größeren, ebenfalls mit Wasser gefüllten Behälter CD gehoben wird, aber so, daß das Wasser in der Glocke bleibt. Während nun oben durch eine feine Öffnung E die Luft einströmt, sinkt das Wasser, so daß die Oberfläche desselben jede Stunde einen der in das Glas eingeritzten Kreise passiert.

Fig. 163.



Wasseruhr aus dem 18. Jahrhundert.

Zuweilen ließ man das auslaufende Wasser ein Rad, und dieses ein zweites Rad drehen, an dessen Achse ein Zeiger befestigt war, der die Stunden anzeigte. Derartige Zahnradverbindungen für diesen Gebrauch sind vielleicht eine Erfindung des Ktesibios, der um 140 v. Chr. in Alexandria lebte und Lehrer des Mathematikers Heron war. Die Stunden wurden dadurch angegeben, daß ein Steinchen in ein Metallbecken geworfen wurde. Bei einer Wasseruhr, die der Kalif Harun al Raschid im 9. Jahrhundert Karl dem Großen schenkte, dienten zu demselben Zwecke kupferne Kugeln.

Fig. 163 zeigt eine Wasseruhr, wie sie noch im 18. Jahrhundert in Gebrauch waren. Der Behälter A hat oben Zufluß und unten Abfluß. Der

Digitized by Google

letztere bringt die schwimmende Glocke zum Steigen, so daß die Schnur *ABC* (*C* ist ein Gewicht) die Achse mit dem Zeiger gleichförmig dreht. Damit das Ablaufen des Wassers stets mit derselben Geschwindigkeit erfolgt, wird das Wasser in dem Behälter auf unveränderlicher Höhe gehalten, und zwar dadurch, daß man das überflüssige Wasser auf dieser Höhe durch ein in der Figur nicht sichtbares Rohr ablaufen läßt.

Namentlich im Orient blühte die Wasseruhrmacherei, in China, wo man noch heute fast in jeder Stadt Wasseruhren findet, und bei den Arabern, die die Wasseruhren zu reinen Automaten entwickelten, die nicht nur die Stunden, die Feste, den Weg der Sonne im Tierkreis u. s. w. anzeigten, sondern die zu verschiedenen Stunden allerhand merkwürdige Dinge verrichteten. In Europa fanden die Wasseruhren nur langsam Eingang. Noch im 12. Jahrhundert mußte der Sakristan im Kloster Cluny die Sterne beobachten, um die Mönche zum Gebet wecken zu können. Aber im Mittelalter fanden die Uhren doch in den meisten größeren Städten Italiens, Frankreichs und Englands Eingang. Auf dem Markusplatz in Venedig war im 16. Jahrhundert eine Wasseruhr, an der jede Stunde Mauren und die heiligen drei Könige hervortraten, die Jungfrau Maria grüßten und die Glocke anschlugen.

Während so die Kunstfertigkeit nichts zu wünschen übrig ließ, wurden in der Hauptsache, d. h. in der genauen Zeitbestimmung, keine wesentlichen Fortschritte gemacht.

Statt Wasser benutzte man (z. B. Tycho Brahe) zuweilen auch Quecksilber oder Öl.

Vielleicht etwas jünger und nicht so verbreitet sind die Sanduhren. Die Chaldäer kannten sie, und die Griechen benutzten sie, um die Zeit für Reden zu bemessen. Archimedes gibt eine Beschreibung der Sanduhr, in der wir das Stundenglas erkennen.

Fig. 164.

Sanduhr.

Zwei birnenförmige Glasgefäße stehen durch eine enge Öffnung mit einander in Verbindung und enthalten eine größere Menge Sand. Wenn der Sand aus dem oberen in den unteren Raum gelaufen ist, wird das Glas umgewendet, so daß der Sand von neuem in einer gewissen Zeit (einer Minute, einer Stunde) aus dem einen Raum in den anderen läuft. Im Mittelalter waren die Sanduhren allgemein in Gebrauch. In Nürnberg gab es eine Sanduhrmacherzunft, und die Stutzer sollen eine Sanduhr am Knie befestigt getragen haben. Sehr genau gingen diese Uhren natürlich nicht, aber doch benutzte man noch in der Mitte des 17. Jahrhunderts an Bord der Schiffe Sanduhren zur Zeitbestimmung und also zur Längenbestimmung (§ 47). Heutzutage benutzt man noch an Bord der Schiffe die Sanduhr beim „Loggen".

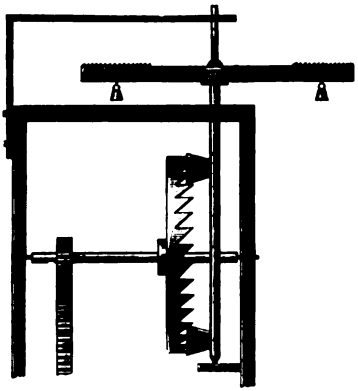
§ 159. Eine neuere Art von Zeitmessern sind die Raduhren, deren Räderwerk durch ein Gewicht in Bewegung gesetzt wird. Um die Achse eines Zahnrades ist ein Seil gewunden, an dem ein Gewicht hängt. Dieses setzt

Digitized by Google

die Achse in Drehung, das Zahnrad greift mit seinem Umfang in ein kleineres Zahnrad (einen sogenannten Trieb) ein, welches auf einer anderen Achse sitzt. Diese Achse dreht sich also schneller als die erste, und ihre Bewegung wird in derselben Weise auf eine dritte Achse übertragen, die sich also wieder schneller dreht, als die zweite u. s. w. Das letzte Rad dreht sich also bedeutend schneller als das erste.

Das am schnellsten laufende Zahnrad muß nun in irgend einer Weise gehemmt werden, damit der Gang des ganzen Mechanismus gleichförmig wird. In den ältesten Zeiten hat man hierzu einen Windfang benutzt. Der Widerstand der Luft, der hier als Hemmung dient, ist aber je nach der Temperatur und der Dichtigkeit der Luft etwas veränderlich. Auch Schmutz in den Achslagern u. dergl. spielen eine wichtige Rolle, und derartige Uhren hatten daher keinen sehr gleichförmigen Gang. Derartige Werke finden noch Anwendung, wo es nicht auf sehr große Genauigkeit ankommt, z. B. bei Spieldosen, Laufwerken an Telegraphenapparaten u. dergl.

Fig. 165.



Die „Bilanz" in den Uhren vor Erfindung der Pendeluhr.

Verbessert wurde der Apparat, als man den Windfang durch die sogenannte „Bilanz" (Fig. 165) ersetzte. Von dem Räderwerk ist in der Figur nur die oberste Achse angegeben, welche einen Trieb und ein eigentümlich geformtes Zahnrad trägt. Dieses wird durch das Räderwerk in Bewegung gesetzt, aber durch das abwechselnde Eingreifen zweier an der Achse der Bilanz befestigter Lappen fortwährend angehalten. Wenn sich das Zahnrad dreht, so drückt ein Zahn den oberen Lappen nach hinten. Diese Bewegung hört aber auf, sobald ein Zahn den unteren Lappen trifft und diesen nach vorn drückt. Dann wird das Rad wieder durch das Eingreifen des oberen Lappens angehalten u. s. w. — Das Rad geht also bei einem Hin- und Hergang der Achse jedesmal um einen Zahn weiter. Je schwerer die Bilanz gemacht wird, desto längere Zeit braucht sie für einen solchen Hin- und Hergang. Der Gang der Uhr wird daher durch die Belastung der Bilanz reguliert.

Auch die Räderuhren mit Gewichten sind von den Mohamedanern nach Europa gekommen. Die Einführung derselben begann im 11. Jahrhundert. Im Jahr 1232 erhielt Kaiser Friedrich II. eine solche Uhr vom Sultan von Ägypten zum Geschenk. Sie zeigte außer der Zeit den Lauf der Sonne, des Mondes, der Planeten und der Sterne an.

Dante erwähnt solche Uhren im 10. Gesang des „Paradies", und sie wurden später in vielen europäischen Städten, z. B. im Dom zu Ribe in Jütland, als Turmuhren eingeführt. Daß sie nicht sehr genau gingen, kann

Digitized by Google

man daraus ersehen, daß man die Uhr in Ribe in der Weise regulierte, daß man mehr oder weniger Backsteine auf die Bilanz legte. Tycho Brahe hatte vier derartige Uhren. Eins der Räder hatte einen Durchmesser von 3 Fuß und 1200 Zähne. Die Bewegung desselben war eine so schwerfällige, daß zuweilen mit dem Hammer nachgeholfen werden mußte.

Fig. 166.

Huygens.

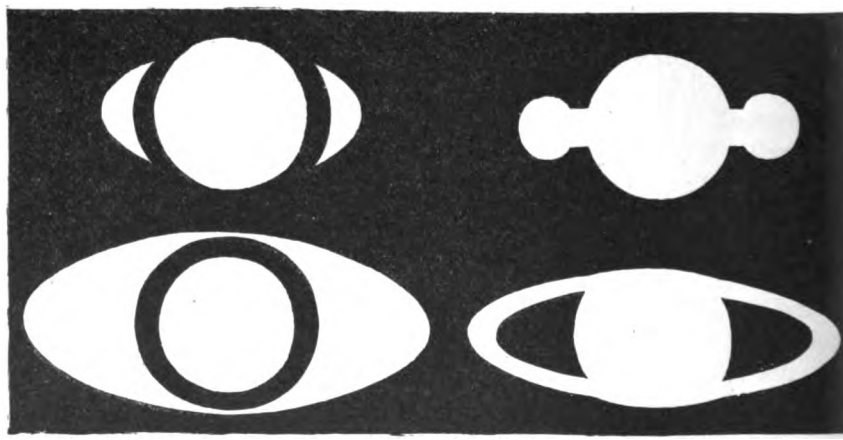
§ 160. Man hatte sich, wie aus dem Gesagten hervorgeht, seit den ältesten Zeiten bemüht, einen Zeitmesser zu schaffen. Wenn es trotzdem nicht gelungen war, ein zufriedenstellendes Instrument herzustellen, so beweist dies, daß das Bedürfnis an und für sich nicht genügt, eine bahnbrechende Erfindung hervorzurufen. Diese verdankt man vielmehr dem geistigen Bedürfnis, die Erscheinungen zu verstehen, in diesem Falle dem Bedürfnis, welches

Digitized by Google

Galilei empfand, die Bewegung der Kronleuchter im Dom zu Pisa zu verstehen. Der junge Galilei dachte bei dieser Gelegenheit sicher nicht daran, der Menschheit einen Zeitmesser zu verschaffen, und doch waren es die Arbeiten Galileis und Huygens', welche zu diesem Ziele führten.

§ 161. Christian Huygens, geb. 1629 im Haag, erhielt den ersten Unterricht, namentlich auch in Mathematik, von seinem Vater, einem wohlhabenden und begabten Manne, der Kabinettsekretär beim Prinzen von Oranien war. Der junge Huygens widmete sich dem Studium der Rechtswissenschaft, welches er bereits im Alter von 22 Jahren abgeschlossen hatte. In demselben Jahre veröffentlichte er eine ausgezeichnete mathematische Schrift, die großes Aufsehen erregte. Er unternahm Reisen nach Deutschland und Dänemark und setzte seine mathematischen und physikalischen Studien fort. Eins der wichtigsten Ergebnisse dieser Studien war die Pendeluhr (§ 162). Er versandte eine kleine Schrift hierüber im Jahre 1658. Eine größere Schrift über die Theorie und die Anwendung des Pendels erschien im Jahre 1673.

Fig. 167.



Ältere Abbildungen des Saturn.

Im Jahre 1655 entdeckte er, daß das merkwürdige Aussehen, welches Saturn nach älteren Beobachtungen haben sollte, von einem Ring herrührt, der den Planeten umgibt. In demselben Jahre entdeckte er den ersten der acht Monde des Saturn.

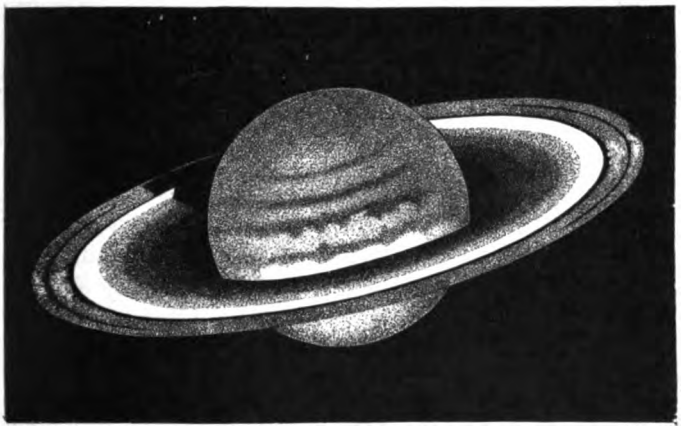
Diese Entdeckungen standen natürlich mit den großen Verdiensten im Zusammenhange, die sich Huygens um die Verbesserung des Fernrohrs erworben hat.

Bereits im Jahre 1663 wurde Huygens während eines Aufenthaltes in London zum Mitglied der Royal Society ernannt, und als Ludwig XIV. im Jahre 1665 die Akademie der Wissenschaften in Paris errichtete, wurde außer anderen hervorragenden Gelehrten auch Huygens unter günstigen Bedingungen

Digitized by Google

nach Paris berufen, nachdem sich der Minister Colbert versichert hatte, daß Huygens, der bereits mehrere gute Freunde in Paris hatte, der Einladung

Fig. 168.



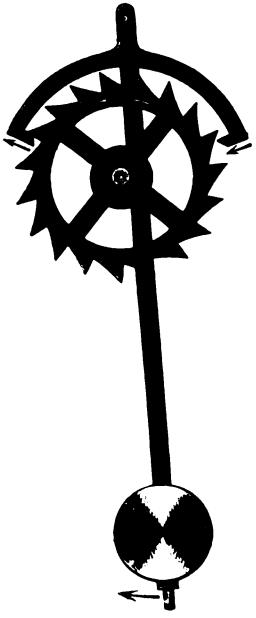
Saturn mit dem Ring.

Folge leisten würde. Huygens war einige Jahre lang eins der hervorragendsten Mitglieder der Akademie, von welcher wertvolle Arbeiten ausgingen. Allein als später das Edikt von Nantes aufgehoben wurde, fühlte er sich in Paris nicht mehr sicher und er zog, wie viele andere, von dort hinweg. Seit dieser Zeit lebte er bis zu seinem im Jahre 1695 erfolgten Tode im Haag.

Huygens war einer der bedeutendsten Denker und Naturforscher, die gelebt haben, und zwar hat er nicht nur auf den genannten Gebieten ausgezeichnete Arbeiten ausgeführt. Wir werden später auf verschiedenen anderen, zuvor noch nicht betretenen Gebieten der Physik und Mathematik seine Spuren antreffen.

§ 162. Die Huygenssche Pendeluhr ist nichts anderes als die alte Räderuhr mit Gewichten, in welcher die Bilanz durch ein Pendel ersetzt ist. Fig. 169 zeigt diejenige Form der Hemmungsvorrichtung, zu der Huygens im Jahre 1659 überging und die noch jetzt allgemein in Gebrauch ist. In der Figur ist von dem Räderwerk nur dasjenige Rad gezeichnet, welches sich am schnellsten bewegt und in welches die Hemmungsvorrichtung eingreift. Die Umdrehungsrichtung des Steigrades ist durch einen

Fig. 169.



Pendel mit Anker und Steigrad.

Digitized by Google

weißen Pfeil angegeben. Im Augenblick, den die Figur darstellt, wird das Rad durch den Ankerhaken auf der linken Seite festgehalten. Wenn aber das Pendel selbst nach links schwingt, läßt der Ankerhaken den betreffenden Zahn los, und das Rad dreht sich weiter, aber nur um einen halben Zahn, indem der Ankerhaken rechts in eine Zahnlücke eingreift und also auf dieser Seite einen Zahn anhält. Schwingt das Pendel dann wieder nach rechts, so wird der Zahn auf dieser Seite losgelassen, dafür aber wieder ein Zahn auf der linken Seite angehalten. **Bei jedem Hin- und Hergang des Pendels geht also das Rad um einen Zahn weiter.**

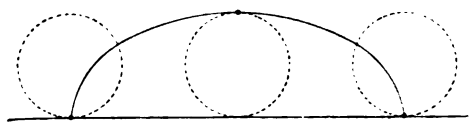
Die Ankerhaken sind, wie aus der Figur ersichtlich ist, schräg abgeschnitten, so daß ein Zahn, der von einem der Haken angehalten worden ist und dann von diesem losgelassen wird, über die schräge Ankerfläche gleiten muß. Auf diese Weise erteilt der Anker dem Pendel einen kleinen Stoß, wodurch bewirkt wird, daß das Pendel nicht nach und nach zum Stillstehen kommt.

Werden nun Zeiger angebracht, die die Zählung der Umdrehungen der Räder und also der Pendelschwingungen besorgen, so hat man einen Zeitmesser, dessen Gang von der Schmierung der Achsen, der Größe der Gewichte u. s. w. unabhängig ist und nur durch die Pendellänge bestimmt wird. Der Gang der Uhr wird dadurch reguliert, daß man die Pendellänge (durch Verschiebung der Linse) verändert.

§ 163. Huygens empfing aus Anlaß der Lösung dieser wichtigen Aufgabe viele Beglückwünschungen und Ehrenbezeugungen. Es fehlte aber auch nicht an Versuchen, ihm die Ehre streitig zu machen. Die Italiener behaupteten, allerdings mit Unrecht, die von Galilei vorgeschlagene Vorrichtung (§ 157) sei eine Pendeluhr gewesen, und der bekannte Chemiker Becher behauptete, man habe schon früher durch Pendel regulierte Uhren gehabt. Huygens fand sogar bei dem dänischen Gesandten im Haag eine Pendeluhr, die im Besitze Tycho Brahes gewesen war. Ole Römer klärte jedoch die Sache dahin auf, daß das Pendel später eingesetzt worden war; und ebenso waren verschiedene andere alte Uhren nachträglich in Pendeluhren umgewandelt worden.

§ 164. Die Zeit, welche ein Pendel zu einer Schwingung braucht, ist nahezu unabhängig von der Größe der Schwingung. Huygens ruhte nicht eher, als bis er gefunden hatte, auf welcher Bahn sich ein Körper bewegen muß, damit die Schwingungszeit von der Größe der Schwingung vollständig unabhängig ist. Es zeigte sich, daß dies die sogenannte Cykloide oder Radlinie ist. Wenn ein Rad auf einer Ebene hinrollt, so beschreibt ein Punkt des Umfanges eine Radlinie (Fig. 170). Wendet man die Radlinie mit der hohlen Seite nach oben (Fig. 171), so hat man die „Isochrone", d. h. die Linie, auf der ein Punkt unter dem Einfluß der Schwere schwingen muß,

Fig. 170.



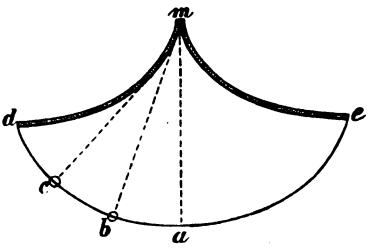
Die Radlinie.

Digitized by Google

damit die Schwingungszeit unabhängig von der Weite der Schwingung ist. Eine Kugel braucht genau dieselbe Zeit, um im Punkt *a* anzukommen, einerlei ob sie in *b*, *c* oder *d* anfängt zu fallen.

Huygens fand ferner, daß man einen Körper auf einer Cykloide *dcba* schwingen lassen kann, indem man ihn an einer Schnur im Punkt *m* aufhängt, in dem zwei feste Schablonen von Cykloiden *md* und *me* zusammenstoßen. Praktische Bedeutung hat diese höchst sinnreiche Erfindung allerdings nicht. Ein gewöhnliches Pendel, dessen Linse einen Kreisbogen beschreibt, ist zweckmäßiger, da es bei kleinen Schwingungen nur unbedeutend von der Cykloidenbewegung abweicht.

Fig. 171.



Cykloidenpendel.

Ein etwas jüngerer Mathematiker holländischer Herkunft, der 1667 in Basel geborene Johann Bernoulli, fand, daß die Radlinie nicht nur „Tautochrone", d. h. Linie gleicher Fallzeit, sondern auch „Brachistochrone", d. h. Linie der kürzesten Fallzeit, ist. Wenn sich ein Körper unter dem Einfluß der Schwere so schnell als möglich von *b* nach *a* oder von *c* nach *a* oder von *d* nach *a* bewegen soll, so muß er sich auf dieser Linie bewegen. Auf jedem anderen Wege, auch auf dem geradlinigen, braucht er längere Zeit, um von dem höher gelegenen Punkt nach dem tiefer gelegenen zu kommen.

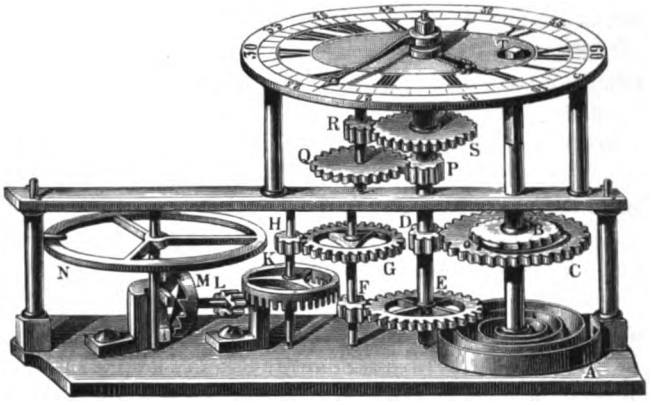
§ 165. Uhren mit Gewicht und Pendel sind natürlich nicht als Taschenuhren und Schiffsuhren zu gebrauchen. Man hatte schon früher das Gewicht durch eine Spiralfeder ersetzt, und anstatt des Windfangs oder der Bilanz benutzte man andere Gegenstände, welche die Bewegung hemmen konnten, z. B. eine Schweinsborste. Ein Nürnberger namens Peter Hele soll um 1510 derartige Taschenuhren, die sogenannten Nürnberger Eier, in den Handel gebracht haben. Brauchbare Zeitmesser wurden die Taschenuhren jedoch erst, als sie mit einer ähnlichen Vorrichtung wie das Pendel, mit der sogenannten Unruhe, versehen wurden. Diese ist ohne Zweifel erst um 1658 vom Engländer Robert Hooke erfunden worden. Hooke veröffentlichte jedoch nichts von der Sache, und Huygens schrieb 1675 über die Unruhe als seine eigene Erfindung. Als jedoch Hooke seine Priorität geltend machte, wurde diese von Huygens bereitwilligst anerkannt.

Die Unruhe ist ein kleines Schwungrad *N* (Fig. 172, a. f. S.), dessen Achse mit zwei Lappen versehen ist, die abwechselnd in die Zähne des Hemmungsrades eingreifen. Eine Spiralfeder ist mit dem einen Ende an der Achse der Unruhe, mit dem anderen Ende an einem auf der Uhrplatte stehenden Stativ befestigt. Wenn die Unruhe durch Drehung aus der Ruhelage gebracht wird, so schwingt sie unter dem Einfluß der Elastizität der Spiralfeder ähnlich wie ein Pendel unter dem Einfluß der Schwere hin und her. Dadurch, daß die

Digitized by Google

an der Achse angebrachten Lappen in die Zähne des Hemmungsrades eingreifen, wird einerseits die Bewegung des Hemmungsrades fortwährend unterbrochen, und anderseits wird die Unruhe durch die Stöße, welche sie von dem Hemmungsrade bekommt, in Bewegung erhalten. Wie die Drehung

Fig. 172.



Uhr mit Unruhe *N*, die von der aufgezogenen Feder *A* getrieben wird.

der Achse, die durch die Feder *A* in Bewegung gesetzt wird, auf die Achse des Hemmungsrades, sowie auf die Zeigerachsen übertragen wird, ist in der Figur leicht zu verfolgen.

§ 166. Robert Hooke war 1635 auf der Insel Wight geboren. Er war von schwächlichem Körperbau. Trotz eines etwas unregelmäßigen Bildungsganges, der zwischen Handwerk und Studium wechselte, wurde er ein gelehrter Mann. Er wurde Experimentator und später Sekretär an der Royal Society. Als er die Taschenuhr (mit Unruhe) erfunden hatte, erhielt er von Robert Boyle ein günstiges Angebot behufs Ausbeutung dieser Erfindung, allein mit der ihm eigentümlichen Reizbarkeit lehnte er das Angebot ab, so daß er von seiner Erfindung gar keinen Nutzen hatte, und er hatte es nur dem Edelmut Huygens' zu verdanken, daß er nicht auch der Ehre der Erfindung verlustig ging. Hooke hat auf verschiedenen Gebieten der Physik wertvolle Arbeiten geliefert und namentlich viele praktische wissenschaftliche Meßinstrumente konstruiert. Eine eigentlich große Leistung hat er jedoch nicht aufzuweisen, da sich seine wissenschaftliche Tätigkeit auf zu viele und verschiedenartige Gegenstände erstreckte. Er hat, wie es scheint, ein ziemlich einsames und trauriges Dasein geführt, und noch als alter Mann legte er sich oft erst morgens angekleidet ins Bett, nachdem er die Nacht hindurch gearbeitet hatte. — Bekannt ist sein heftiger Streit mit Newton, den er beschuldigte, die Gravitationstheorie von ihm entlehnt zu haben, wofür er jedoch keine Beweise beigebracht hat. Hooke hat allerdings die Ansicht ausgesprochen, daß die Himmelskörper aufeinander eine von der Entfernung abhängige Anziehung ausüben, durch die

Digitized by Google

ihre Bahn bedingt wird, und er kann daher mit Recht als ein Vorläufer Newtons bezeichnet werden[1]). Er starb 1703.

Andere krummlinige Bewegungen.

§ 167. Man bekommt eine Vorstellung davon, wie schwierig es war, sich von den aristotelischen Ideen frei zu machen, wenn man sieht, wie sehr Francis Bacon, ein Zeitgenosse Galileis, noch in denselben befangen war, trotzdem er sich mehr als irgend ein anderer bemühte, sich aus denselben herauszuarbeiten.

Bacon war 1561 in London als Sohn des Großsiegelbewahrers von England, Nikolaus Bacon, geboren. Er widmete sich der juristischen Laufbahn. Trotz der Protektion des Grafen Essex gelang es ihm nicht, ein einträgliches Staatsamt zu bekommen. In dem Prozeß gegen den Grafen Essex, der zu dessen Hinrichtung führte, hat Bacon eine durchaus nicht ehrenvolle Rolle gespielt, und durch eine Schrift, die er im Auftrage der Königin Elisabeth schrieb, um die Hinrichtung des Grafen Essex zu rechtfertigen, machte er sich sehr unbeliebt. Erst unter der Regierung Jakobs VI. gelang es ihm, sein lange erstrebtes Ziel, die Bekleidung eines hohen Staatsamtes, zu erreichen. Nachdem er ein Jahr das Amt eines Großsiegelbewahrers bekleidet hatte, wurde ihm das Amt eines Lordkanzlers von England übertragen. Auch erhielt er die Würde eines Barons von Verulan und Viscount von St. Albans. Aber kaum hatte er sich zu dieser Höhe emporgeschwungen, so wurde er wegen Bestechlichkeit, deren er sich bei der Verleihung von Ämtern schuldig gemacht hatte, seiner Würden und Ämter für verlustig erklärt, zu 40 000 Pfd. Sterling Geldstrafe und zu lebenslänglichem Gefängnis verurteilt. Der König erließ ihm jedoch die Gefängnisstrafe und verlieh ihm einen Jahresgehalt von 1800 Pfund. Bacon überlebte diese Demütigung nur wenige Jahre. Er starb 1626.

Im Jahre 1620, ein Jahr vor seinem Sturz, gab er ein Buch heraus, welches im wesentlichen davon handelt, wie die Wissenschaften betrieben werden müssen. In diesem Buche tritt er als so entschiedener Gegner der philosophierenden aristotelischen Naturbetrachtung auf, daß er von vielen, namentlich von den Engländern, als Reformator der Naturforschung betrachtet worden ist. Von seiner hohen Stellung aus konnte er mit Nachdruck geltend machen, daß „leere Spekulationen am Verfall der Wissenschaften schuld sind", und daß man zum erfahrungsmäßigen Naturstudium (Empirie) zurückkehren müsse. „Alle Bäche der Empirie ergießen sich in den Ozean der Philosophie." Aus ihr fließt die Erkenntnis der wirklichen Ursachen. Die Annahme von Endursachen ist in der Physik als Erklärungsgründe zu verwerfen. Bacon eiferte so sehr gegen alle Spekulation, daß selbst die Mathematik für ihn nur eine untergeordnete Bedeutung hatte.

[1]) Vergl. die Anmerkung zu § 295.

Digitized by Google

Eine derartige Sprache war in der damaligen Zeit gewiß angebracht, und sie hat sicher ihre Wirkung nicht verfehlt, zumal sie von einer so hohen Stelle kam. Besser wäre es allerdings gewesen, statt zu reden, dementsprechend zu handeln, wie es Galilei längst getan hatte, ehe das Buch Bacons erschienen war. Und wie befolgte Bacon selbst seine Vorschriften? Er will z. B. untersucht wissen, welche Körper durch die Schwere, und welche durch die Leichtigkeit bewegt werden, welches die Grenzen der Leichtigkeit sind, und ob die Luft zu den schweren oder zu den leichten Körpern gehört. Er unterscheidet 19 verschiedene Arten der Bewegung. Eine derselben ist die „Bewegung aus Abscheu vor Bewegung". Und dabei eifert er gegen Endursachen!

§ 168. Ein ganz anderer Fortschritt war es, wenn Galilei das Trägheitsgesetz aufstellte und behauptete, daß bei der gleichzeitigen Wirkung von Kräften jede einzelne dasselbe bewirkt, was sie für sich allein bewirken würde. Mit Hilfe dieser einzigen Wahrheit lassen sich alle Bewegungserscheinungen erklären, und so erklärte, wie wir gesehen haben, Galilei den freien Fall, die Bewegung auf der schiefen Ebene und die Pendelbewegung. Er erklärte ferner die Wurfbewegung, über die früher eigentümliche Vorstellungen geherrscht hatten.

Nach Aristoteles sollte die Bewegung eines in horizontaler Richtung geworfenen Körpers aus drei Teilen bestehen, einer horizontalen geraden Linie (der gewaltsamen Bewegung), einem Kreisbogen, und zwar einem Viertelkreis (der gemischten Bewegung) und einer vertikalen geraden Linie (der natürlichen Bewegung). In einem Werke aus dem Jahre 1561 wurde diese Theorie dahin abgeändert, daß die Wurfbahn nur aus zwei geraden Linien bestand. Die erste durchfliegt der Körper geradeaus mit Gewaltsamkeit, und wenn deren Kraft erschöpft ist, fällt er den natürlichen Weg nach unten.

Ein hervorragender italienischer Mathematiker, Tartaglia, hatte in einem 1537 erschienenen Werke darauf hingewiesen, daß jeder Teil einer Wurfbahn gekrümmt sein muß. Eine genaue Erklärung der Wurfbahn vermochte er jedoch nicht zu geben.

§ 169. Galileis Erklärung der Wurfbewegung wollen wir an einigen Beispielen erläutern.

Wir wollen zuerst annehmen, der Körper werde in horizontaler Richtung *ab* (Fig. 173) geworfen. Er schreitet dann in dieser Richtung mit gleichförmiger Geschwindigkeit, z. B. 5 Fuß in jeder Viertelsekunde, fort. Berechnet man nun (vergl. § 149) die Fallhöhen für $^1/_4$, $^1/_2$, $^3/_4$ u. s. w. Sekunden, so ergibt sich, daß der Körper in

$^1/_4$	$^2/_4$	$^3/_4$	$^4/_4$	$^5/_4$	$^6/_4$	Sekunden
1	4	9	16	25	36	Fuß

durchfällt.

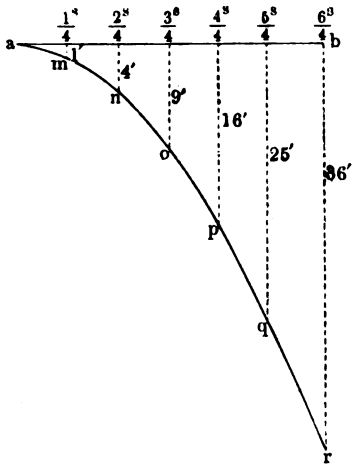
Wenn der Körper vom Punkt *a* aus in horizontaler Richtung geworfen wird, so würde er, wenn er nicht der Wirkung der Schwere unterworfen wäre, sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit in $^6/_4$ Sekunden von *a* nach

Digitized by Google

b bewegen. Infolge der Einwirkung der Schwerkraft fällt er aber gleichzeitig in der angegebenen Weise. Infolgedessen kommt der Körper nach $^1/_4$ Sekunde im Punkt *m*, nach $^2/_4$ Sekunde im Punkt *n* an u. s. w. Die Bahn *amnopqr*, welche er beschreibt, ist die sogenannte Parabel, die schon den Mathematikern des 4. Jahrhunderts v. Chr. bekannt war.

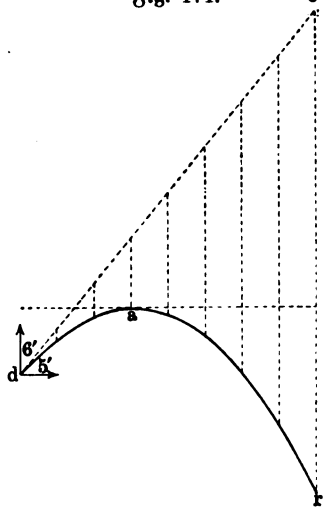
§ 170. Auch wenn der Körper in einer anderen Richtung geworfen wird, beschreibt er eine Parabel. Wir wollen annehmen, er werde vom Punkt *d*

Fig. 173.



Bahn eines horizontal geworfenen Körpers.

Fig. 174.



Wurfbewegung.

(Fig. 174) aus in einer solchen Richtung geworfen, daß er in jeder Viertelsekunde 5 Fuß in horizontaler und 6 Fuß in vertikaler Richtung fortschreitet. Die Bewegung des Körpers in horizontaler Richtung wird durch die Schwerkraft nicht verändert, dagegen wird sich die Wirkung der Schwerkraft auf die Höhe des Körpers in jedem Augenblick geltend machen. Die Höhen, welche der Körper mit seiner Anfangsgeschwindigkeit nach 0, $^1/_4$, $^2/_4$, $^3/_4$, $^4/_4$, $^5/_4$, $^6/_4$, $^7/_4$, $^8/_4$ Sekunden erreichen würde, sind

0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48 Fuß.

In denselben Zeiten durchfällt aber der Körper

0, 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64 Fuß.

Also ist die Höhe, welche er wirklich erreicht, beziehungsweise

0, 5, 8, 9, 8, 5, 0, 7, 16 Fuß über *d*,

folglich die Tiefe unter *a* (9 Fuß über *d*)

9, 4, 1, 0, 1, 4, 9, 16, 25 Fuß.

Man erhält also dieselben Tiefen wie beim wagerechten Wurf, wenn man in dem Beispiel vom Punkt *a* ausgeht, wo sich der Körper (nach $^3/_4$ Sekunden)

Digitized by Google

im höchsten Punkt seiner Bahn befindet. Nach diesen berechneten Zahlen ist Fig. 174 gezeichnet, in der *d* der Ausgangspunkt, *dc* der Weg ist, den der Körper in $^3/_4$ oder 2 Sekunden zurücklegen würde. Von den Punkten, in welchen der Körper nach $^1/_4$, $^2/_4$, $^3/_4$ u. s. w. Sekunden ankommen würde, sind Vertikallinien gezogen und auf diesen die entsprechenden Fallhöhen abgetragen. So erhält man die Bahn *dar*, die eine Parabel ist. Infolge des Luftwiderstandes weicht jedoch die Bahn etwas von der Parabel ab.

§ 171. Es würde nicht uninteressant sein, mit solchen galileischen Erklärungen Bewegungstheorien zu vergleichen, die noch später von Descartes (Cartesius) aufgestellt wurden. Doch würde eine solche Vergleichung wenig Belehrendes bieten. Descartes war 1596 in La Haye in der Touraine geboren und starb 1650 in Stockholm. Er wurde in der Jesuitenschule in La Flèche erzogen, nahm als junger Mann Kriegsdienste und machte mehrere Feldzüge mit, bereiste dann verschiedene Länder, hielt sich lange in Holland auf (§ 106) und folgte zuletzt einer Einladung der Königin Christine von Schweden, nach Stockholm zu kommen. — Descartes war ein Mann von außergewöhnlicher Begabung. Berühmt hat er sich namentlich durch seine Philosophie gemacht. Aber auch um die Mathematik (analytische Geometrie) hat er sich große Verdienste erworben. In der Physik dagegen hat er nur einzelne Erscheinungen (z. B. den Regenbogen), die einer mathematischen Behandlung fähig waren, aufgeklärt. Descartes hielt im Gegensatz zu Galilei die Spekulation für die beste Methode der Naturforschung. Er beginnt mit dem Zweifel an allem. Hierdurch kommt er zur Gewißheit seines eigenen Daseins, von dieser zur Gewißheit des Daseins Gottes, von der Lehre von Gott zu den Eigenschaften des Raumes und der Materie, und von diesen zu der Lehre von der Bewegung und dem Stoß. Die Bewegungsgesetze, zu denen er auf diese Weise kam, bilden ein sonderbares Gedankengewebe, und es ist schwer zu begreifen, wie ein so hoch begabter Mathematiker wie Descartes an demselben Befriedigung hat finden können. Und doch sagt er selbst, er sei von der Richtigkeit seiner Bewegungsgesetze so sehr überzeugt, daß er für den Fall, daß sie nicht durch den Versuch bestätigt würden, seinem Verstande mehr Vertrauen schenken würde, als seinen Sinnen. Und was vielleicht noch merkwürdiger ist, ein Gelehrter nach dem anderen beugte sich vor seiner Bewegungslehre und den „Cartesianischen Wirbeln", in denen sich der Äther bewegte und in denen dieser die Planeten um die Sonne führte. In seinen Werken findet man Dinge wie Fig. 175. Sein Kamerad Mersenne von der Jesuitenschule und der Festungsintendant Petit hatten einige Kanonenschüsse in vertikaler Richtung abgefeuert, aber das Zurückfallen der Kugel nicht beobachtet. Daher fragt die Etikette der Figur: Retombera-t-il (wird sie wieder herabfallen)? Natürlich war der Kanonenlauf nicht genau vertikal gerichtet, was sehr schwer zu erreichen ist.

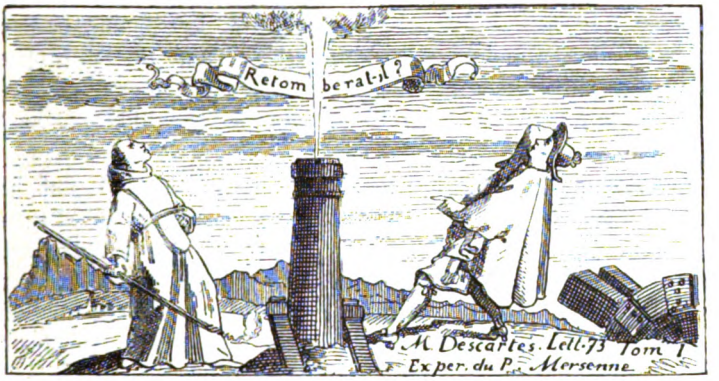
Wie weit Descartes davon entfernt war, die Leistungen Galileis richtig zu würdigen, geht aus einem Brief an Mersenne hervor, in dem er sagt: „Was Galilei anbetrifft, so will ich Ihnen sagen, daß ich ihn niemals

Digitized by Google

geſehen und auch keinen Verkehr mit ihm gehabt habe und daß ich folglich von ihm nichts entlehnt haben kann und auch in ſeinen Büchern nichts ſehe, was ich beneidete, und faſt nichts, was ich als das meinige eingeſtehen möchte."

Zu den vielen, die Descartes als unfehlbar betrachteten, gehörte der Holländer van Schooten, der Lehrer und väterliche Freund von Huygens.

Fig. 175.



Eine von Descartes geſtellte Frage.

Als der letztere mit ſeiner Lehre vom Stoß an die Öffentlichkeit trat, geſchah dies zum großen Leidweſen und unter wohlgemeintem Widerſtand ſeines Lehrers.

§ 172. Einer der bedeutendſten Vorläufer Galileis, der die Autorität des Ariſtoteles nicht unbedingt anerkannte, iſt Benedetti, geb. 1530 in Venedig, geſt. 1590 in Turin. In einer Mechanik, welche er 1585 veröffentlichte, erklärt er den Urſprung der Zentrifugalkraft, die auf einen Körper wirkt, der ſich auf einem Kreis bewegt. Es iſt für einen Körper natürlich, ſchreibt er, ſich in gerader Linie zu bewegen. Wenn er daher nicht feſtgehalten wird, ſo entfernt er ſich auf gerader Linie (der Tangente), wie der Schmutz von den Rädern eines ſchnell fahrenden Wagens. Dies Beſtreben eines Körpers, ſich vom Mittelpunkt zu entfernen, hat das zur Folge, was man die Zentrifugalkraft nennt.

Hiermit war die Zentrifugalkraft in befriedigender Weiſe erklärt, nachdem Galilei das Trägheitsgeſetz ausgeſprochen hatte. Wird ein Körper dadurch, daß man ihn an einem Seil befeſtigt, gezwungen, ſich auf einer kreisförmigen Bahn zu bewegen, ſo muß das Seil mit einer gewiſſen Kraft an dem Körper ziehen. Mit einer ebenſo großen Kraft zieht der Körper an dem Seil.

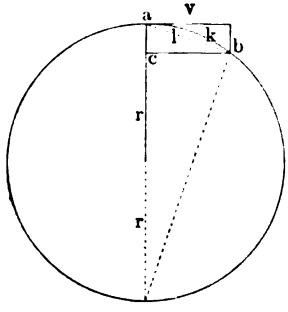
Huygens war der erſte, der eine ſichere Berechnung der Zentrifugalkraft ausgeführt hat. Wahrſcheinlich wurde ſeine Aufmerkſamkeit auf dieſen Gegenſtand durch ſeine Beſchäftigung mit dem Pendel, namentlich dem koniſchen Pendel (Zentrifugalpendel), gelenkt. Dies iſt ein Pendel, welches ſich

Digitized by Google

nicht in einer Ebene hin und her bewegt, sondern eine Kegelfläche beschreibt. Entfernt man die Kugel eines Fadenpendels nach einer gewissen Richtung hin aus der Ruhelage und erteilt ihr dann eine Geschwindigkeit in einer anderen Richtung, so beschreibt die Kugel eine mehr oder weniger ellipsenförmige Bahn, und wenn die Richtung und Größe der Geschwindigkeit richtig bemessen wird, einen Kreis[1]). Huygens veröffentlichte zum erstenmal seine Berechnung der Zentrifugalkraft in einem Buch über die Uhr, welches im Jahre 1673 erschien. Später schrieb er ein ausführlicheres Werk über den Gegenstand. Um die von Huygens ausgeführte Berechnung verstehen und ähnliche Berechnungen ausführen zu können, die an und für sich großes Interesse bieten und die vielfache praktische Anwendung finden, muß in den beiden folgenden Paragraphen die Kenntnis einiger mathematischer Sätze vorausgesetzt werden.

§ 173. Ein Körper befinde sich im Punkt *a* (Fig. 176) und habe eine solche Geschwindigkeit, daß er in der Zeiteinheit den Weg *v* zurücklegen würde.

Fig. 176.



Erklärung der Zentrifugalkraft.

Der Körper kann sich jedoch nicht vom Kreis entfernen, weil er mit dem Mittelpunkt desselben durch ein Seil oder etwas Ähnliches verbunden ist. Das Seil muß fortwährend einen nach dem Mittelpunkt gerichteten Zug ausüben (Zentrifugalkraft). Dieser Zug ist gerade so groß wie der Zug, den der Körper infolge der Zentripetalkraft nach außen hin ausübt, gerade so wie bei einem Körper, der an einem Seil aufgehängt ist, das Seil denselben Zug nach oben ausübt, den der Körper nach unten ausübt.

Wenn der Körper sich dem Trägheitsgesetz entsprechend bewegen könnte, so würde er in der Zeiteinheit die gerade Linie *v* durchlaufen. Wird er aber auf dem Kreis festgehalten, so daß er sich nach Ablauf der Zeiteinheit im Punkt *b* befindet, so muß er außer der Trägheitsbewegung *v* zugleich die Bewegung *ac* gemacht haben. Diese letztere Bewegung ist durch den gleichmäßig wirkenden Zug des Seils hervorgerufen, und sie ist gleich der Zentrifugalkraft *f*.

Ebenso wie nun die Schwere, die im Laufe einer Sekunde einem Körper die Geschwindigkeit *g* erteilt, den Körper den Weg $^1/_2 g$ zurücklegen läßt (§ 149), wird die Zentrifugalkraft *f* in einer Sekunde den Körper den Weg $^1{}_2 f$ zurücklegen lassen. Die Linie *ac* ist also $^1/_2 f$.

Nach einem Satze der Geometrie ist das Quadrat von *ab* gleich dem

[1]) Konische Pendel finden bei Apparaten Anwendung, bei denen die Bewegung eine gleichförmige sein muß, aber die nicht springend sein darf, wie die Bewegung des Sekundenzeigers einer Uhr.

Digitized by Google

Rechteck aus ac und $2r$. Da wir aber die Bewegung in unendlich kleinen Zeitteilchen betrachten müssen, werden l, k und v gleich lang. Also ist

$$v^2 = ac \,.\, 2r.$$

Nun ist aber

$$ac = {}^1/_2 f,$$

folglich

$$v^2 = {}^1/_2 f \,.\, 2r = f \,.\, r,$$

also

$$f = \frac{v^2}{r}.$$

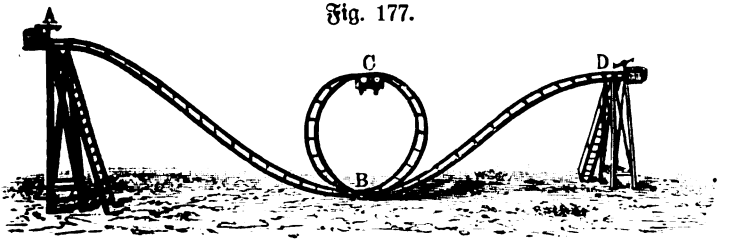
Die Zentrifugalkraft ist also, wie aus dieser Formel ersichtlich ist, um so größer, je größer die Geschwindigkeit ist. Einer 2-, 3-, 4 mal so großen Geschwindigkeit entspricht eine 4-, 9-, 16 mal so große Zentrifugalkraft, d. h. die Zentrifugalkraft wächst im Verhältnis des Quadrates der Geschwindigkeit. Ferner ist die Zentrifugalkraft um so größer, je kleiner der Krümmungsradius ist, denn dieser steht im Nenner. Bei einer gewissen Geschwindigkeit v wird also die Zentrifugalkraft um so größer, je plötzlicher sich die Bewegungsrichtung ändert.

Beispiel 1. Ein Wagen fährt mit einer Geschwindigkeit von 2 m in der Sekunde auf einem Wege, der einen Bogen mit dem Radius 6 m bildet. Also ist die Zentrifugalkraft $\frac{2^2}{6} = 0{,}66$ m. Da nun die Schwere g oder 9,8 m ist, so ist die Zentrifugalkraft ungefähr gleich $^1/_{15}$ der Schwere. Eine Person, die in dem Wagen sitzt, wird also mit dem fünfzehnten Teil ihres Gewichtes nach außen gedrückt.

Beispiel 2. Eine Kugel von 0,25 kg Gewicht rollt in einer horizontalen Rinne mit einer Geschwindigkeit von 0,3 m in der Sekunde. Die Rinne macht eine Krümmung mit dem Radius 15 cm. Welchen Druck übt die Kugel gegen die Seite der Rinne aus?

Beispiel 3. Ein Wagen rollt auf Schienen eine schiefe Ebene hinab und durchläuft dann eine kreisförmige Schleife der Bahn (Fig. 177). Damit

Fig. 177.



Bewegung eines Wagens in einer Zentrifugalbahn.

er dies tut, muß er eine hinreichend große Geschwindigkeit haben. Wenn der Durchmesser der Kreisbahn 6 m ist, wie hoch über der höchsten Stelle der Kreisbahn muß der Wagen (ohne Rücksicht auf Reibung und Luftwiderstand)

Digitized by Google

mindestens anfangen zu rollen, damit die Zentrifugalkraft mindestens so groß wie die Schwerkraft ist?

§ 174. Wenn die Bewegung fortwährend auf kreisförmiger Bahn vor sich geht, so läßt sich die Formel noch etwas bequemer gestalten. Nennt man die Zeit, welche der Körper zu einem Umlauf braucht, die Umlaufszeit T, so legt der Körper in dieser Zeit mit der Geschwindigkeit v den Weg $v \,.\, T$ zurück. Dieser Weg, der Umfang des Kreises, läßt sich aber auch durch die Formel $2\pi r$ ausdrücken.

Man hat also

$$v \,.\, T = 2\pi r,$$

folglich

$$v^2 \,.\, T^2 = 4\pi^2 r^2$$

und

$$v^2 = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2}.$$

Da nun

$$v^2 = f \,.\, r,$$

ist

$$f \,.\, r = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2}$$

oder

$$f = \frac{4\pi^2 r}{T^2}.$$

Man ersieht aus dieser Formel, daß die Zentrifugalkraft um so größer ist, je kleiner das Quadrat der Umlaufszeit ist, was mit dem Satz über die Zentrifugalkraft und die Geschwindigkeit übereinstimmt. Ferner ersieht man aus der Formel, daß die Zentrifugalkraft um so größer wird, je größer der Krümmungsradius ist. Dies scheint auf den ersten Blick mit den früheren Gesetzen im Widerspruch zu stehen, was jedoch nicht der Fall ist. Es habe z. B. auf einer Karussellbahn ein Körper a einen 5mal so großen Abstand vom Mittelpunkt als ein anderer Körper b. Dann ist die Zentrifugalkraft von a nach der letzten Formel 5mal so groß als die Zentrifugalkraft von b. Wenn man die erste Formel benutzt, so darf man nicht vergessen, daß die Geschwindigkeit von a 5mal so groß ist, als die Geschwindigkeit von b. Aus diesem Grunde würde die Zentrifugalkraft von a 25mal so groß sein, als die Zentrifugalkraft von b. Allein wegen des Krümmungsradius muß sie 5mal so klein sein, als die von b; $^{25}/_{5}$ ist aber 5.

Beispiel 1. Eine Zentrifuge hat einen Durchmesser von 30 cm und macht 60 Umdrehungen in der Sekunde. Das Wievielfache von der Schwerkraft ist die Zentrifugalkraft?

Beispiel 2. Die Regulatorkugeln einer Dampfmaschine machen 90 Umdrehungen in der Minute und sind 10 cm von der Achse entfernt. Wie verhält sich die Zentrifugalkraft zur Schwerkraft?

Digitized by Google

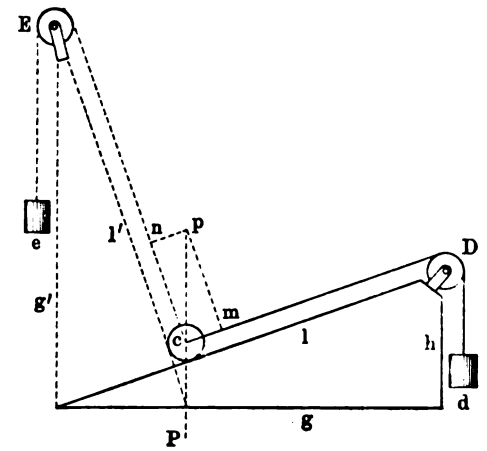
Beispiel 3. Welcher Bruchteil der Schwerkraft wird am Erdäquator infolge der Rotation der Erde durch die Zentrifugalkraft aufgehoben? (Durchmesser des Äquators 1719 Meilen.)

Das Parallelogramm der Kräfte.

§ 175. Stevin hatte erkannt (§ 136), daß eine Kugel c auf der schiefen Ebene l (Fig. 178) durch ein Gewicht d im Gleichgewicht gehalten wird, dessen Größe sich zum Gewicht von c verhält wie die Höhe h zur Länge l der schiefen Ebene. Dies bildete für Stevin den Ausgangspunkt für die folgenden Schlußfolgerungen.

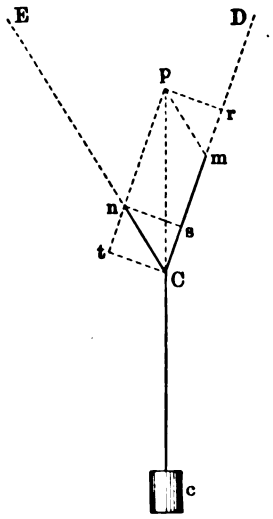
Es wird keine Störung des Gleichgewichts stattfinden, wenn man die schiefe Ebene hinwegnimmt und an c senkrecht zur schiefen Ebene ein Seil ziehen läßt, welches über eine Rolle E läuft und durch ein Gewicht e gespannt

Fig. 178.



Übergang von der schiefen Ebene zum Parallelogramm der Kräfte.

Fig. 179.



Zug eines Gewichtes an zwei Seilen.

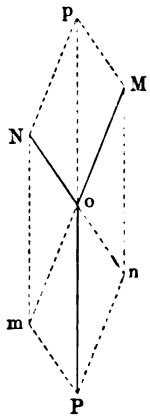
wird, welches gerade hinreicht, durch seinen Zug die Unterlage l zu ersetzen. Nun kann man sich denken, daß links von c eine zweite schiefe Ebene l' angebracht ist, deren Höhe g' gleich der Grundlinie und deren Grundlinie gleich der Höhe der ersten schiefen Ebene ist. Auf dieser schiefen Ebene wird ein Gewicht e mit c im Gleichgewicht sein, wenn sich e zu c verhält wie g' oder g zu l. Nun kann man sich auch die zweite schiefe Ebene durch ein Seil cDd mit dem erforderlichen Gewicht d ersetzt denken. Dann hängt das Gewicht c an den beiden Seilen cD und cE, die durch die Gewichte d und e gespannt werden, welche sich zu c verhalten wie h und g zu l. Zieht man nun von c aus die Vertikallinie cP und gibt derselben eine Länge, die die

Digitized by Google

Größe des Gewichtes c bildlich vorstellt, und verlängert diese Linie um ihre eigene Länge nach oben, so müssen cm und cn die Größe der Gewichte d und e angeben. Denn die Seiten des kleinen Dreiecks cmp stehen untereinander in demselben Verhältnis wie die Seiten des Dreiecks, welches von der Länge, der Höhe und der Grundlinie der schiefen Ebene (l, h, g) gebildet wird. Diese verhalten sich aber wie die Gewichte d, c und e. Eine einzelne Kraft cP kann also durch zwei andere cm und cn im Gleichgewicht gehalten werden, welche die Seiten eines Rechtecks bilden, in welchem die Verlängerung jener Kraft die Diagonale bildet. Stevin zeigte ferner, wie man in ähnlicher Weise den Zug in zwei Seilen, die ein Gewicht tragen, bestimmen kann, auch wenn die Seile nicht einen rechten Winkel miteinander bilden. Hängt das Gewicht c (Fig. 179, a. v. S.) an den Seilen DC und EC, so kann man die Vertikallinie Cc nach oben verlängern und sich unter Cp das Gewicht von c vorstellen. Zieht man nun von p die Linie pm parallel zu CE und pn parallel zu CD, so wird Cm die Größe des Zuges im Seil CD und Cn den Zug in CE vorstellen.

Für die Richtigkeit dieser Behauptung gibt Stevin keinen klaren Beweis. Ein solcher läßt sich in folgender Weise führen. Man zieht die drei Linien Ct, ns und pr senkrecht zu Cm. Cp kann nun (nach dem vorhergehenden Satze) durch Ct und Cr ersetzt werden. Das letztere ist aber gleich $Cm + mr$ oder $Cm + Cs$. Man hat jetzt die drei Kräfte Ct, Cm und Cs. Von diesen kann die erste und die letzte durch Cn, folglich kann Cp durch Cm und Cn ersetzt werden.

Fig. 180.



Drei auf einen Punkt wirkende Kräfte.

Stevin hat also gefunden, daß die Kräfte, die an drei in einem Punkt befestigten Seilen wirken, im Gleichgewicht sind, wenn die in den drei Richtungen abgetragenen Linien, welche die relative Größe der Kräfte darstellen, solche Längen haben, daß das Parallelogramm aus zweien dieser Linien eine Diagonale hat, die dieselbe Größe, aber die entgegengesetzte Richtung hat wie die dritte Linie.

Wenn z. B. die Diagonale op (Fig. 180) des Parallelogramms, dessen Seiten oM und oN sind, ebenso groß ist, aber die entgegengesetzte Richtung hat wie oP, so sind oM und oN mit oP im Gleichgewicht. Da nun die drei Kräfte einander das Gleichgewicht halten, können wir ebenso gut sagen, daß oM und oP im Gleichgewicht mit oN sind. Hieraus folgt, daß on die Diagonale des Parallelogramms $MoPn$ ebenso groß und entgegengesetzt gerichtet ist, wie oN. Ebenso hat die Diagonale om des Parallelogramms $NoPm$ dieselbe Größe und die entgegengesetzte Richtung oM.

§ 176. Auf einem ganz anderen Wege (durch die Erkenntnis des Trägheitsgesetzes) entdeckte Galilei, was man das Parallelogramm der Bewegungen nennen könnte. Wenn ein Körper sich unter dem Einfluß einer

Digitized by Google

Kraft von o nach M, und unter dem Einfluß einer anderen Kraft in derselben Zeit von o nach N bewegen würde, so bewegt er sich unter dem gleichzeitigen Einfluß beider Kräfte in derselben Zeit auf der Diagonale des Parallelogramms von o nach p.

Da nun Galilei weiter fand, daß eine Kraft durch die Geschwindigkeit gemessen werden kann, die sie einem Körper in der Zeiteinheit erteilt (§ 149 und 150), so hätte er aus dem Satz vom Parallelogramm der Bewegungen den folgenden Schluß ziehen können. Wenn die Gesamtbewegung, welche zwei Kräfte zuwege bringen können, so groß und von entgegengesetzter Richtung ist wie die Bewegung, welche eine dritte Kraft hervorbringen kann, so ist die von allen drei Kräften hervorgebrachte Bewegung gleich Null, d. h. die drei Kräfte befinden sich im Gleichgewicht.

In dieser Allgemeinheit wurde der Satz allerdings weder von Stevin, noch von Galilei ausgesprochen, aber es muß doch anerkannt werden, daß sie die Sache in ihren Einzelheiten aufgeklärt haben. Erst Newton brachte den Satz in der zuletzt angegebenen Form zum Ausdruck. Man nennt ihn jetzt gewöhnlich den Satz vom Parallelogramm der Kräfte.

Das Parallelogramm der Kräfte findet Anwendung, wenn man „die resultierende Kraft" zweier an demselben Punkt angreifenden Kräfte finden will. Wenn die beiden Kräfte nach Richtung und Größe gegeben sind, so ist die resultierende Kraft oder die „Resultante" die Diagonale des Parallelogramms der Kräfte, denn diese ist ebenso groß und von entgegengesetzter Richtung, wie eine Kraft, die mit den beiden gegebenen Kräften im Gleichgewicht sein würde.

Man kann auch mehr als zwei Kräfte „zusammensetzen", indem man zuerst zwei derselben zusammensetzt, dann die Resultante dieser beiden mit der dritten zusammensetzt, u. s. w.

In entsprechender Weise kann eine Kraft in „Komponenten" zerlegt werden. Zeichnet man nämlich zwei andere Kräfte so, daß jene die Diagonale in dem von den beiden anderen gebildeten Parallelogramm wird, so können die beiden letzteren dieselbe Wirkung hervorbringen, wie die erstere.

Mit Hilfe des Satzes vom Parallelogramm der Kräfte kann leicht die Gesamtwirkung der Schwerkraft und der Zentrifugalkraft ermittelt werden.

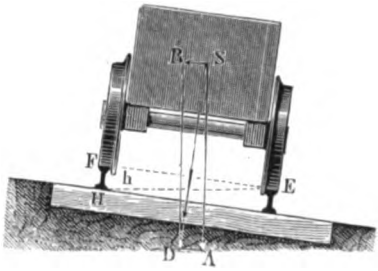
Beispiel 1. Ein Eisenbahnzug fährt mit einer Geschwindigkeit von 20 m in einer Kurve, deren Krümmungsradius gleich 300 m ist. Welchen Bruchteil der Schwerkraft bildet die Zentrifugalkraft? An solchen Stellen legt man die innere Schiene etwas tiefer als die äußere (Fig. 181, a. f. S.), so daß die Resultante SD der Schwerkraft SA und der Zentrifugalkraft SB auf der Bahn annähernd senkrecht steht.

Beispiel 2. Ein Zirkuspferd läuft in einer Bahn von 20 m Durchmesser mit einer Geschwindigkeit von 20 km in der Stunde. Wie stark muß die Bahn geneigt sein, und wie schwer fühlt sich das Pferd während des Laufes, wenn es 420 kg wiegt?

Digitized by Google

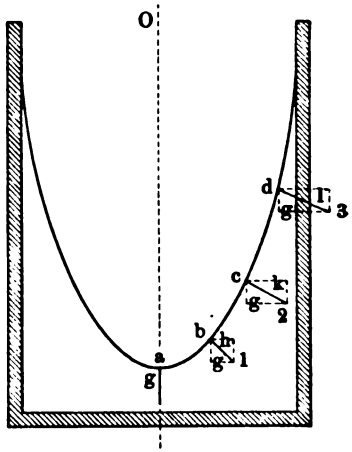
Beispiel 3. Wir werden später sehen, daß sich die Oberfläche einer Flüssigkeit immer senkrecht auf die Richtung der Kraft stellt, die in jedem Punkte der Oberfläche wirkt. Wird eine Flüssigkeit um eine vertikale Achse gedacht (durch Umrühren in einer Tasse, durch Rotation einer Zentrifuge und dergleichen), so nimmt die Oberfläche die in Fig. 182 gezeichnete Form an.

Fig. 181.



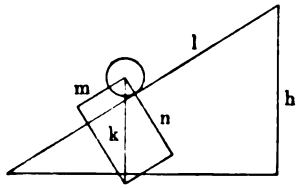
Eisenbahnwagen auf einer Kurve.

Fig. 182.



Oberfläche einer Flüssigkeit unter dem Einfluß der Zentrifugalkraft.

Fig. 183.



Zerlegung einer Kraft in zwei Komponenten.

In den Punkten *a*, *b*, *c* und *d* ist die Schwerkraft überall dieselbe, die Zentrifugalkraft dagegen ist bezw. 0, 1, 2, 3. Die an den verschiedenen Punkten wirkenden Kräfte sind also *g*, *h*, *k* und *l*, und auf diesen steht die Oberfläche in den Punkten *a*, *b*, *c* und *d* senkrecht. Je größer die Umdrehungsgeschwindigkeit wird, desto mehr sind die wirkenden Kräfte nach außen gerichtet und desto steiler wird die Oberfläche. Die paraboliſche Vertiefung wird größer. Bei hinreichend großer Geschwindigkeit kommt der Boden des Gefäßes zum Vorschein und die Oberfläche der Flüssigkeit wird fast vertikal (cylindrisch).

Beispiel 4. Die Bedingung für das Gleichgewicht auf der schiefen Ebene läßt sich jetzt in anderer Weise als früher ableiten. Das Gewicht des Körpers *k* (Fig. 183), welches vertikal nach unten strebt, wird in die beiden Komponenten *n* und *m* zerlegt, von denen die erste den Druck gegen die schiefe Ebene, die andere die Kraft angibt, mit der der Körper in der Richtung der schiefen Ebene wirkt. Die letztere verhält sich aber offenbar zu *k* wie *h* zu *l* (vergl. § 136).

Digitized by Google

Der Stoß.

§ 177. Galilei und ebenso sein Schüler Torricelli macht die Bemerkung, daß die Stoßkraft im Vergleich mit der Druckkraft unendlich groß ist. Stoß und Druck können nicht miteinander verglichen werden.

Beispiele wie die folgenden bilden allerdings anscheinend eine Bestätigung dieser Behauptung. Ein heftiger Schlag gegen eine offenstehende Tür kann diese nicht so leicht schließen, wie ein gelinder Druck. Ein Glas, welches einen Druck vom Gewicht eines Mannes ertragen würde, zerspringt, wenn mit einem Schlüssel ein kurzer Schlag auf dasselbe ausgeübt wird.

Die Behauptung ist aber doch nicht richtig. Richtiger ist es zu sagen, daß der Stoß ein sehr intensiver Druck von kurzer Dauer ist.

Auch Descartes stellt eine nicht ganz richtige Behauptung über den Stoß auf, wenn er sagt, daß ein kleiner Körper, der mit einem größeren, der in Ruhe ist, zusammenstößt, mit unveränderter Geschwindigkeit zurückkehre, während der größere in Ruhe bleibe.

Ein Deutscher namens Markus Marci, der etwas später wie Galilei über die Bewegungslehre schrieb — sein Buch erschien 1639 in Prag — macht verschiedene Angaben über den Stoß, die richtiger sind als das meiste, was früher über diesen Gegenstand veröffentlicht worden war. Er bemerkt z. B. ganz richtig, daß eine elastische Kugel beim Stoß gegen eine andere von gleicher Masse, die in Ruhe ist, ihre Geschwindigkeit auf diese überträgt, während sie selbst zur Ruhe kommt. Im übrigen ist er indessen, was Klarheit und Genauigkeit der Entwickelungen betrifft, mit Galilei gar nicht zu vergleichen.

§ 178. Man hat früher geglaubt, daß der englischen Royal Society die Ehre gebühre, zu den Arbeiten angeregt zu haben, durch welche die Stoßbewegung aufgeklärt wurde, indem sie im Jahr 1668 ihren mathematischen Mitgliedern eine Preisaufgabe über diesen Gegenstand stellte. Die Aufgabe wurde von drei hervorragenden Gelehrten beantwortet, John Wallis, Christopher Wren und Huygens. Allein Huygens hatte seine Lösung der Frage bereits im Jahr 1656 fertig und zögerte nur mit der Veröffentlichung derselben, weil van Schooten befürchtete, er würde sich Descartes gegenüber kompromittieren (§ 171). Als er im Jahr 1663 in London Wren mit Versuchen über den Stoß beschäftigt traf, konnte er aus seinen Formeln, die er im Kopf hatte, in jedem einzelnen Falle das Resultat voraussagen. Wallis (1616 bis 1703), Professor an der Universität in Oxford, war ein ausgezeichneter Mathematiker und hat verschiedenes geleistet, was bleibenden Wert hat. Wren (1632 bis 1722) war Professor in London und später in Oxford, ist aber namentlich als Baumeister berühmt geworden. In den 50 Jahren von 1668 bis 1718 hat er mehr als 60 Kirchen und andere öffentliche Gebäude aufgeführt, unter anderen die großartige Paulskirche in London.

Die drei Beantwortungen der Aufgabe über den Stoß hatten das eigentümliche, daß sie sich gegenseitig ergänzten.

Digitized by Google

Wallis behandelte nämlich den Zusammenstoß zweier Körper, die sich nach dem Stoß nicht wieder voneinander trennen. Dies ist bei unelastischen Körpern, wie Blei, Ton u. dergl., der Fall. Diese behalten die Formveränderung, welche sie durch den Stoß erleiden, bei, und es macht sich bei ihnen kein Bestreben bemerkbar, die ursprüngliche Form wieder anzunehmen.

Wallis wies darauf hin, daß die Bewegungsgröße, d. h. das Produkt aus der Masse und der Geschwindigkeit vor und nach dem Stoß, gleich groß ist. Wenn z. B. eine Kugel von 10 kg mit einer Geschwindigkeit von 5 m eine Kugel von 5 kg mit 2 m Geschwindigkeit einholt, so daß also die Bewegungsgröße $50 + 10 = 60$ ist, so gehen die beiden Kugeln zusammen (15 kg) mit einer Geschwindigkeit von 4 m weiter, weil $15 . 4 = 60$ [1]). Bewegen sich die Körper in entgegengesetzter Richtung, so ist natürlich die Bewegungsgröße nach dem Stoß gleich der Differenz der Bewegungsgrößen vor dem Stoß.

Beispiel. Stoßen zwei gleich große unelastische Kugeln, die sich mit gleichen Geschwindigkeiten in entgegengesetzter Richtung bewegen, zusammen, so kommen sie beide zur Ruhe.

§ 179. Wren und Huygens dagegen behandelten den Fall, daß die Körper elastisch sind, so daß die durch den Stoß erzeugte Formänderung wieder aufgehoben wird, indem die Körper ihre ursprüngliche Form annehmen. Sowohl Wren als auch Huygens macht dabei die Voraussetzung, daß auf die Drucke, welche die Körper in der kurzen Zeit der Berührung bis zum Augenblicke der größten Annäherung der Schwerpunkte aufeinander ausüben, in der dann folgenden Zeit, während sich die Körper voneinander entfernen, ganz entsprechende Drucke folgen, daß sich, mit anderen Worten, die Geschwindigkeitsänderung, welche die Körper während der Zusammendrückung erleiden, sich nochmals wiederholt, während sie sich wieder auf das ursprüngliche Volumen ausdehnen.

Wren hat das Verdienst, diese Voraussetzung durch Versuche bestätigt zu haben. Huygens kam in einer sehr genialen Weise zu demselben Resultat wie Wren. Er macht zuerst einige einfache Voraussetzungen, und aus diesen zieht er dann seine Folgerungen. Zu diesen Voraussetzungen gehört die folgende. Wenn zwei elastische Kugeln von gleicher Größe mit gleicher Geschwindigkeit zusammenstoßen, so fahren sie mit derselben Geschwindigkeit auseinander, mit der sie zusammentrafen. Während der Zusammendrückung werden die beiden Geschwindigkeiten vernichtet (§ 178, Beispiel), und während der Ausdehnung erhält jede der beiden Kugeln eine ebenso große Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung. Huygens setzt sodann voraus, daß alle Bewegung relativ ist, d. h. im vorliegenden Falle, wenn die relativen Be-

[1]) Sind die Massen M und m, die Geschwindigkeiten C und c, so ist die Geschwindigkeit v nach dem Stoß durch die Gleichung

$$M . C + m . c = (M + m)\, v$$

bestimmt. Bei entgegengesetzter Richtung der Bewegungen wird die eine Geschwindigkeit negativ gerechnet.

Digitized by Google

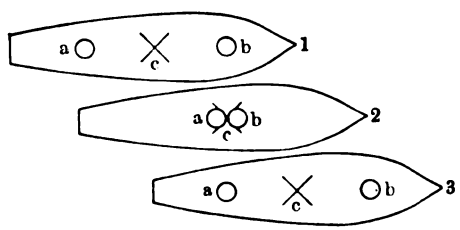
wegungen der Kugeln bestimmt sind, so ist es einerlei, ob man sich die ganze Erscheinung an einer ruhenden Stelle oder an einer Stelle denkt, die selbst in Bewegung ist (Fig. 184). Wenn der erwähnte Versuch des Zusammenstoßens zweier gleich großer Kugeln in einem Boot ausgeführt wird, so kann man

Fig. 184.

Die Bewegung zusammenstoßender Kugeln, von einem Boot und vom Lande aus gesehen (nach Huygens).

die drei durch Fig. 185 veranschaulichten Augenblicke unterscheiden: 1. *a* und *b* nähern sich einander mit gleich großen Geschwindigkeiten; 2. sie stoßen in der Mitte bei *c* zusammen; 3. sie entfernen sich voneinander mit gleich großen Geschwindigkeiten. Wenn sich nun das Boot fortbewegt, und zwar mit derselben Geschwindigkeit wie die Kugeln, so wird ein Zuschauer auf dem Lande vor dem Zusammenstoß (1 und 2) den Eindruck bekommen, als ob die Kugel *b* in Ruhe wäre (weil die Geschwindigkeit von *b* nach Westen und die Geschwindigkeit des Bootes nach Osten gleich sind) und als ob die Kugel *a* eine doppelt so große Geschwindigkeit hätte, als sie wirklich hat. Nach dem Zusammenstoß dagegen wird der Zuschauer den Eindruck bekommen (2 und 3), als ob die Kugel *a* in Ruhe wäre (jetzt geht sie ebenso schnell nach Westen als das Boot nach Osten) und als ob *b* jetzt die doppelte Geschwindigkeit hätte. So beweist Huygens, daß, wenn eine elastische Kugel *a* gegen eine ebenso große ruhende Kugel *b* stößt (Fig. 185, 1 — 2), sich die letztere (*b*) mit der Geschwindigkeit der stoßenden Kugel fortbewegt und die erstere (*a*) zur Ruhe kommt (Fig. 185, 2 — 3).

Fig. 185.



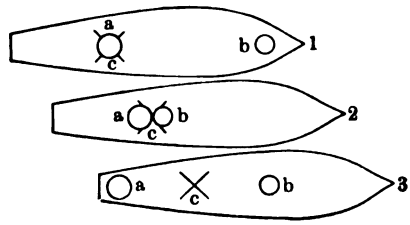
Zusammenstoß gleicher elastischer Kugeln in einem Boot.

In ähnlicher Weise behandelte Huygens den Zusammenstoß ungleich großer Kugeln mit ungleichen Geschwindigkeiten. Es soll hier nicht auf die

Digitized by Google

Einzelheiten dieser Berechnungen eingegangen, sondern nur hervorgehoben werden, wie Huygens durch diese Untersuchungen auf Dinge geführt wurde, die in der Mechanik eine außerordentlich wichtige Rolle spielen.

Fig. 186.



Zusammenstoß ungleich großer Kugeln.

§ 180. In einem Boot, welches nach Osten segelt (Fig. 186, 1), liegt eine größere Kugel *a* an der durch ein Kreuz bezeichneten Stelle *c*. Eine kleinere Kugel *b* rollt vom östlichen Ende des Bootes mit einer Geschwindigkeit von 10 Fuß auf die größere zu und trifft mit dieser zusammen (Fig. 186, 2). Die größere Kugel kommt dadurch in Bewegung. Wir wollen annehmen, sie bewege sich mit einer Geschwindigkeit von 6 Fuß nach Westen (Fig. 186, 3). Wir wollen ferner annehmen, das Boot bewege sich mit einer Geschwindigkeit von 3 Fuß, also mit der halben Geschwindigkeit der Kugel *a* nach Osten. Während das Boot aus der Stellung 1 in die Stellung 2 überging, hat die ruhende Kugel eine absolute Geschwindigkeit nach Osten von 3 Fuß (nämlich die Geschwindigkeit des Bootes) gehabt. Während das Boot aus der Stellung 2 in die Stellung 3 überging, hat dieselbe Kugel eine absolute Geschwindigkeit nach Westen von 3 Fuß gehabt (nämlich ihre eigene Geschwindigkeit nach Westen von 6 Fuß, vermindert um die Geschwindigkeit des Bootes nach Osten von 3 Fuß). Die Kugel *a* hat also vor und nach dem Stoß genau dieselbe Geschwindigkeit, nur in entgegengesetzter Richtung. Sie hat also durch den Stoß der anderen Kugel weder Kraft — so wollen wir es einstweilen nennen — gewonnen, noch Kraft verloren, und die Geschwindigkeit der anderen Kugel kann daher auch nur in der Richtung, nicht in der Größe eine Änderung erlitten haben. Vor dem Stoß war die Geschwindigkeit von *b* nach Westen 7 (10 — 3) Fuß, und sie muß nach dem Stoß eine Geschwindigkeit von 7 Fuß nach Osten haben. Da nun das Boot eine Geschwindigkeit von 3 Fuß hat, wird sich die Kugel in dem Boot mit einer Geschwindigkeit von 4 (7 — 3) Fuß bewegen. Vor dem Stoß waren die Geschwindigkeiten der Kugeln in dem Boot 0 Fuß und 10 Fuß nach Westen, nach dem Stoß sind sie 6 Fuß nach Westen und 4 Fuß nach Osten. Vor dem Stoß näherten sie sich also in der Sekunde um 10 Fuß, und nach dem Stoß entfernen sie sich in der Sekunde voneinander um 10 Fuß. So hat Huygens bewiesen, daß zwei ungleiche Kugeln mit ungleichen Geschwindigkeiten sich nach dem Stoß mit derselben Geschwindigkeit voneinander entfernen, als sie sich vor dem Stoß einander nähern[1]).

[1]) Die Geschwindigkeit der ruhenden Kugel ist in Bezug auf das Boot Null, die Geschwindigkeit der anderen Kugel in Bezug auf das Boot — *b*. Nach dem Stoß ist die erstere Geschwindigkeit in Bezug auf das Boot — *a*. Die Geschwindigkeit des Bootes wird gleich *a*/2 angenommen. Die absolute Geschwindigkeit der ersten Kugel

Digitized by Google

Es ist an und für sich interessant, daß sich die Gesetze des Stoßes in einer so einfachen Weise ableiten lassen. Allein das wichtigste ist doch, daß Huygens hierdurch auf Betrachtungen geführt wurde wie diejenigen, welche den Inhalt der folgenden Paragraphen bilden.

Energie.

§ 181. Schon aus den Arbeiten Archimedes', namentlich aber aus dem von Stevin erkannten Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten (§ 134) ging hervor, daß das Produkt aus dem Gewicht eines Körpers und seiner Höhe über einem gewissen Niveau einen Ausdruck — in Fußpfund oder Meterkilogramm — für das gibt, was der Körper leisten kann, wenn er aus der Höhe auf das betreffende Niveau herabfällt. Er kann nämlich einem anderen Körper, sei er groß oder klein, dieselbe Anzahl von Fußpfund mitteilen. Und dieselbe Anzahl von Fußpfund sind erforderlich und hinreichend, um den Körper wieder auf das ursprüngliche Niveau emporzuheben.

Der gehobene Körper besitzt also ein Vermögen, welches der herabgefallene nicht besitzt, das Vermögen, einem anderen Körper eine Anzahl Fußpfund mitzuteilen. Man nennt dieses Vermögen heutzutage die Energie, und da man mehrere Arten von Energie kennt, nennt man diese, die auf der Höhe beruht, auf der sich der Körper befindet, die Energie der Lage.

§ 182. Aus Galileis Untersuchungen über den Fall auf der schiefen Ebene ging hervor, daß ein Körper beim Durchfallen einer gewissen Höhe eine gewisse Geschwindigkeit erhält, und zwar einerlei, ob der Körper frei, d. h. auf der Vertikallinie, oder auf irgend einer anderen Bahn fällt. Mit Hilfe der Fallgesetze (§ 149) kann man leicht berechnen, welche Geschwindigkeit v ein frei fallender Körper in jedem beliebigen Augenblick hat, und welchen Weg s er zurückgelegt hat. Man findet das folgende:

Fallzeit t	Geschwindigkeit $g \cdot t$	Fallhöhe $\frac{1}{2} g \cdot t^2$
1^s	$32 \cdot 1 = 32$ Fuß	$16 \cdot 1^2 = 16$ Fuß
2^s	$32 \cdot 2 = 64$ „	$16 \cdot 2^2 = 64$ „
3^s	$32 \cdot 3 = 96$ „	$16 \cdot 3^2 = 144$ „
4^s	$32 \cdot 4 = 128$ „	$16 \cdot 4^2 = 256$ „
5^s	$32 \cdot 5 = 160$ „	$16 \cdot 5^2 = 400$ „
6^s	$32 \cdot 6 = 192$ „	$16 \cdot 6^2 = 576$ „
7^s	$32 \cdot 7 = 324$ „	$16 \cdot 7^2 = 784$ „

Hieraus ersieht man, in welcher Beziehung die Geschwindigkeit zur Fallhöhe steht, und man wird sich erinnern (§ 157), daß ein Körper mit der-

ist vor dem Stoß $+ a/2$, nach dem Stoß $- a/2$. Die absolute Geschwindigkeit der anderen Kugel ist vor dem Stoß $a/2 - b$, nach dem Stoß $b - a/2$, die Geschwindigkeit in Bezug auf das Boot also $b - a$. Der Unterschied zwischen dieser und der Geschwindigkeit der ersten Kugel $(-a)$ ist b, also unverändert.

Digitized by Google

selben Geschwindigkeit die ursprüngliche Höhe erreichen kann. Ein Körper, dessen Geschwindigkeit 2, 3, 4, 5mal so groß ist als die Geschwindigkeit eines anderen, wird also eine Höhe erreichen können, die 4, 9, 16, 25mal so groß ist als die Höhe, die der andere erreichen kann[1]). Da nun die Energie der Lage eines Körpers durch die Höhe bestimmt ist, so kann ein Körper vermöge seiner Geschwindigkeit eine Energie der Lage erlangen, die der zweiten Potenz der Geschwindigkeit proportional ist. Es ist daher von besonderem Interesse, daß Huygens einen Monat später, als er seine Abhandlung über den Stoß bei der Royal Society eingereicht hatte, einen Zusatz senden konnte, in dem er ausführte, daß beim Stoß elastischer Körper noch etwas anderes als die relativen Geschwindigkeiten unverändert bleibt. Berechnet man nämlich für jeden der beiden Körper das Produkt aus dem Gewicht (der Masse) und dem Quadrat der Geschwindigkeit und bildet die Summe dieser Produkte, so ergibt sich, daß diese Summe vor und nach dem Stoß dieselbe ist[2]). Das, was man die gesamte Geschwindigkeitsenergie (Energie der Bewegung) nennen könnte, ändert sich beim elastischen Stoß nicht.

Man wurde hierdurch um so mehr darauf aufmerksam, daß die Energie eines Körpers (Energie der Lage oder Energie der Bewegung) etwas ist, was unter gewissen Umständen unverändert bleibt. Damals fand man allerdings nicht, daß es unter allen Umständen, z. B. auch beim unelastischen Stoß, unverändert bleibt, bei dem die Energie der Bewegung vollständig vernichtet werden kann (§ 178, Beispiel), ohne daß an Stelle derselben Energie der Lage erreicht wird. Wir werden später sehen, daß dies seinen Grund nur darin hat, daß andere Formen der Energie entstehen, die damals nicht bekannt waren, und daß der Satz von der Erhaltung der Energie ein allgemeingiltiges Gesetz ist, vielleicht das umfassendste Naturgesetz, welches wir heute kennen. So gebührt Huygens die Ehre, zur Begründung dieses Gesetzes einen wesentlichen Beitrag geliefert zu haben.

Flüssigkeiten.

§ 183. Die gebildeten Völker des Altertums hatten zwar keine genaue Kenntnis des Gesetzes für das Gleichgewicht der Flüssigkeiten, allein sie haben es doch verstanden, sich einige der Haupteigenschaften des Wassers zu Nutze zu machen. Schiffe zu bauen und zu benutzen, also die Tragfähigkeit des Wassers für Transportzwecke auszunutzen, verstanden fast alle Küstenbewohner Jahrtausende lang vor unserer Zeitrechnung, und daß man gut zu bauen und zu steuern verstand, beweist die Umsegelung Afrikas, die der ägyptische König Necho um 600 v. Chr. von den Phöniciern ausführen ließ (Fig. 187).

---

[1]) Nach § 149 ist $s = \frac{v^2}{2g}$.

[2]) Sind die Massen A und B, die Geschwindigkeiten vor dem Stoß v und v_1, nach dem Stoß c und c_1, so ist

$$Av^2 + Bv_1^2 = Ac^2 + Bc_1^2.$$

Digitized by Google

Auch große Wasserbauten, Hafenanlagen und Kanäle, wurden schon frühzeitig ausgeführt. Als Beispiel kann der alte Suezkanal genannt werden, der von Sethos (von Herodot Sesostris genannt, gest. 1388 v. Chr.) ausgeführt wurde. Ein Bild an der äußeren Mauer des Tempels von Karnak

Fig. 187.

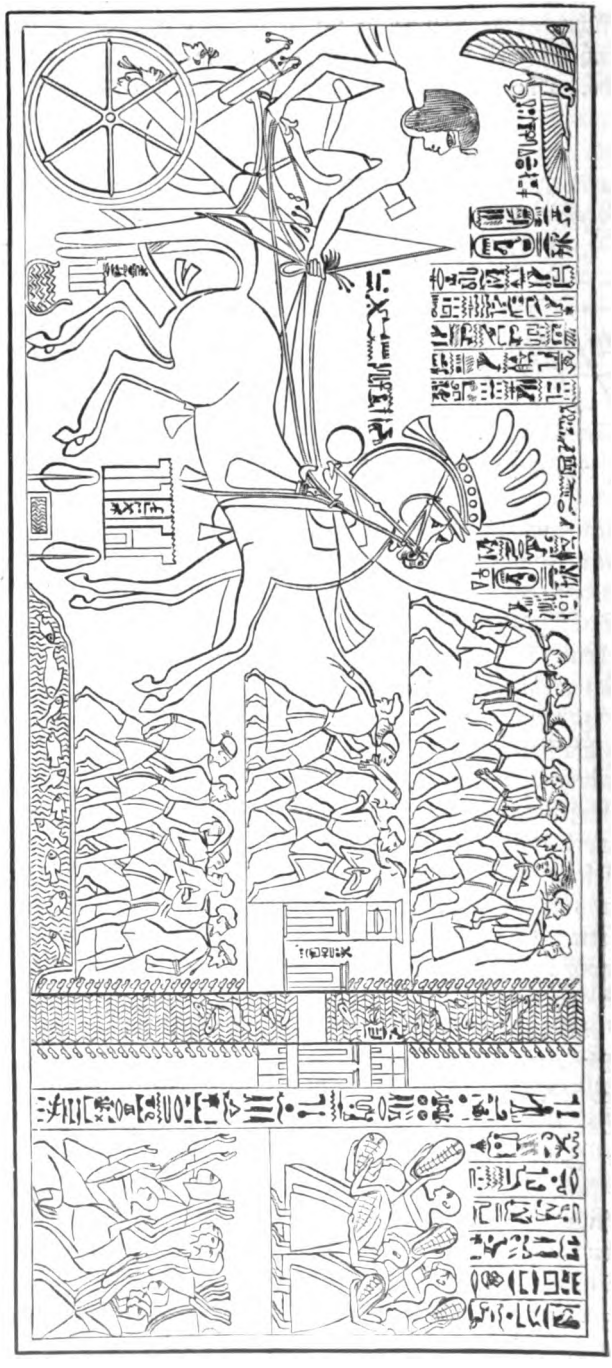
Schiffahrt auf dem Nil. Nach einem Bild in den altägyptischen Gräbern bei Sakkara.

zeigt, wie der aus Syrien heimkehrende Sieger von den Ägyptern bei der mit Festungen geschützten Brücke über den Kanal festlich empfangen wird. Der Kanal selbst, der in der Inschrift als „Durchschnitt" bezeichnet wird, ist durch Wellen und Fische angedeutet (Fig. 188, a. f. S.).

Verschiedene Völker des Altertums, die an großen Flüssen mit Kanälen und Schleusen wohnten, verstanden es ferner, den Boden durch Bewässerung fruchtbar zu machen. Ja nach der Aussage griechischer Schriftsteller sollen die Ägypter Wasserschöpfwerke (Paternosterwerke) gekannt haben, und ähnliche Vorrichtungen sollen im Altertum über einen großen Teil von Asien verbreitet gewesen sein. Später kamen sie mit den Mauren nach Spanien. Ein Schöpfwerk (Eimerkunst) besteht aus einem Rad, an dessen Umfang Eimer so befestigt sind, daß sie während der Drehung des Rades sich an der tiefsten Stelle mit Wasser füllen und dieses an der höchsten Stelle in eine Rinne ausleeren. Fig. 189 (S. 201) zeigt im Vordergrund links ein Schöpfwerk, wie sie jetzt noch in Ägypten in Gebrauch sind. Es ist von den im Altertum gebräuchlichen Vorrichtungen wahrscheinlich nicht wesentlich verschieden. Nur mit Rücksicht auf das Zahnrad ist zu bemerken, daß das Alter desselben ungewiß ist. Die ersten Zahnräder, über die wir zuverlässige Nachrichten haben, fanden sich übrigens in Ägypten. Ktesibios machte nämlich in Alexandria (in der Mitte des zweiten Jahrhunderts v. Chr.) in seinen Wasseruhren Gebrauch von Zahnrädern.

Endlich sind die Wasseruhren selbst ein Zeugnis dafür, daß man auch das gleichmäßige Ausströmen des Wassers zu benutzen verstand, ohne jedoch Untersuchungen und Berechnungen daran anzuknüpfen, die zu wichtigen Ergebnissen geführt hätten. Auch von den anderen genannten, an und für sich wichtigen Anwendungen des Wassers kann dies nicht gesagt werden. Man kann vielmehr behaupten, daß das Wasser, welches durch seine Eigenschaften

Digitized by Google



Der Suezkanal des Königs Sethos I.

Fig. 188.

Digitized by Google

Ein Schöpfwerk in Ägypten.

Digitized by Google

in zahlreichen Naturerscheinungen eine so wichtige Rolle spielt, auch gewisse Eigenschaften besitzt, die sich während der Kindheit des Menschengeschlechtes für die Entwickelung des Verkehrs und der Kultur darboten, ohne daß wissenschaftliche Betrachtungen zur Erkenntnis derselben erforderlich waren.

Auch auf diesem Gebiete war es Archimedes (§ 116 ff.), der zuerst allgemeine Grundsätze aufstellte, aus denen sich manche Folgerungen ganz anderer Art als die ursprünglich beabsichtigten ergaben.

§ 184. Vitruvius, der um das Jahr 13 v. Chr. über die Baukunst geschrieben hat, beschreibt mehrere Arbeiten des Archimedes und fährt dann fort: „Als Hieron, nachdem er zu königlicher Macht erhoben worden, für seine glücklichen Taten einen goldenen Kranz in einem Heiligtum weihen wollte, ließ er diesen gegen Arbeitslohn anfertigen und wog das dafür nötige Gold dem Unternehmer genau vor. Dieser lieferte seiner Zeit das zur vollen Zufriedenheit des Königs gefertigte Werk, und auch das Gewicht des Kranzes schien genau zu entsprechen. Als aber später Anzeige gemacht wurde, es sei Gold unterschlagen und dafür bei der Herstellung des Kranzes ebensoviel Silber beigemischt worden, beauftragte Hieron, aufgebracht darüber, hintergangen zu sein, ohne einen Weg zu finden, jene Unterschlagung zu erweisen, den Archimedes, die Ausfindigmachung eines solchen Überführungsweges auf sich zu nehmen. Dieser, damit eifrig beschäftigt, kam nun zufällig in ein Bad, und als er dort in die Wanne hinabstieg, bemerkte er, daß das Wasser in gleichem Maße über die Wanne austrat, in welchem er seinen Körper mehr und mehr in dieselbe niederließ. Sobald er nun auf den Grund dieser Erscheinung gekommen war, verweilte er nicht länger, sondern sprang vor Freude getrieben aus der Wanne, und nackend seinem Hause zulaufend, zeigte er mit lauter Stimme an, er habe gefunden was er suche. Denn im Laufe rief er auf griechisch aus: εὕρηκα, εὕρηκα (ich habe es gefunden)." Dieser Ausruf ist später bei unzähligen Erfindungen von minderer Bedeutung gebraucht worden.

Was dem König und auch Archimedes Schwierigkeit machte, war folgendes. Sie wußten wohl, daß Gold sehr schwer ist, wahrscheinlich auch, daß Gold ungefähr 20 mal so schwer als eine gleiche Raummenge Wasser ist. An dem Goldklumpen, den der König dem Goldschmied gegeben hatte, konnte man das Gewicht und vermutlich auch den Rauminhalt leicht bestimmen. Aber wie sollte man den Rauminhalt des aus dünnen gekrümmten Blättern bestehenden Kranzes ermitteln? Dies war es, was Archimedes im Bade begriff. Er füllte jetzt eine Schale mit Wasser, bis dies aus einer seitlichen Öffnung auszufließen begann. Er senkte dann den Kranz in das Wasser und sammelte das aus der Öffnung ausfließende Wasser auf. Dies muß natürlich denselben Rauminhalt haben wie der Kranz. Wenn nun der Kranz aus echtem Gold ist, so muß das Gewicht des verdrängten Wassers $^1/_{20}$ vom Gewicht des Kranzes sein. Es zeigte sich aber, daß es mehr wog, daß der Kranz also nicht 20 mal so schwer als das Wasser war. Folglich war das Gold verfälscht.

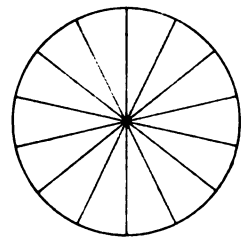
Digitized by Google

Wir wollen der Einfachheit halber annehmen, der Kranz habe 20 Pfund gewogen und er habe nicht 1 Pfund, sondern $1\frac{1}{4}$ Pfund Wasser verdrängt. Wenn nun das Silber zehnmal so viel wiegt als das Wasser, welches es verdrängt, so konnte Archimedes die in dem Kranz enthaltene Menge Silber, nämlich 5 Pfund, berechnen. 5 Pfund Silber verdrängen $\frac{1}{10} \cdot 5$ oder $\frac{1}{2}$ Pfund Wasser, während die 15 Pfund Gold $\frac{1}{20} \cdot 15$ oder $\frac{3}{4}$ Pfund Wasser verdrängen. Das Gold und das Silber zusammen verdrängen also $1\frac{1}{4}$ Pfund Wasser [1]).

§ 185. Dieser Vorfall bildete für Archimedes die Anregung, Betrachtungen über „schwimmende Körper" anzustellen. Er hat über diesen Gegenstand ein ausgezeichnetes Werk geschrieben, welches allerdings nur zum Teil erhalten ist, aber trotzdem erkennen läßt, daß Archimedes auch auf diesem Gebiete schwierige Aufgaben mit gewohnter Sicherheit zu lösen verstand.

Er beginnt mit einer Erklärung, wie sich eine Flüssigkeit, die im Gleichgewicht ist, verhalten muß. Ein kleiner Teil derselben muß von allen Seiten her gleich stark gedrückt werden. Wenn sie nämlich von einer Seite stärker gedrückt wurde, als von einer anderen, so müßte sie sich bewegen, da die Teile einer Flüssigkeit einer Umlagerung keinen Widerstand entgegensetzen. Archimedes beweist, daß die Oberfläche der Erde, wenn diese nur aus Wasser bestände, eine Kugelfläche sein müsse. Denkt man sich nämlich diese Wasserkugel aus lauter gleich großen Pyramiden bestehend, die mit ihren Spitzen im Mittelpunkt zusammenstoßen und deren Grundflächen in der Oberfläche der Kugel liegen, so werden sie alle nach innen streben und sich nur gegenseitig im Gleichgewicht halten können, wenn sie gleich lang sind, was zur Folge hat, daß die Oberfläche eine Kugelfläche sein muß. Allein da diese Kugel sehr groß ist, so wird ein kleiner Teil der Oberfläche (in einem See, einem Teich oder einem Wasserglase) dem Ansehen nach von einer Ebene nicht zu unterscheiden sein, während er tatsächlich ein Teil einer großen Kugelfläche ist (vergl. § 24).

Fig. 190.



Gleichgewicht in einer Wasserkugel.

§ 186. Wenn nun in das Wasser ein Körper gesenkt wird, der genau dasselbe Gewicht hat wie die gleiche Raummenge Wasser, so sinkt er vollständig in das Wasser ein (Fig. 191 a, a. f. S.), denn dieser Körper kann durch sein Gewicht das Wasser ebensogut bei seite drücken, als das Wasser, an dessen Stelle er tritt, weil er dasselbe Gewicht hat wie das verdrängte Wasser.

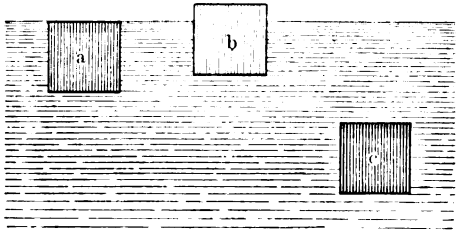
[1]) Wenn der Kranz x Pfund Silber enthielt, so enthielt er $20 - x$ Pfund Gold. Ein Pfund Silber verdrängt $\frac{1}{10}$ Pfund Wasser, also verdrängen x Pfund Silber $\frac{x}{10}$ Pfund Wasser. Ebenso verdrängen $20 - x$ Pfund Gold $\frac{20 - x}{20}$ Pfund Wasser. Das gesamte verdrängte Wasser ist aber $1\frac{1}{4}$ Pfund. Man hat also: $\frac{x}{10} + \frac{20 - x}{20} = 1\frac{1}{4}$ oder $2x + 20 - x = 25$. Also ist $x = 5$.

Digitized by Google

Ist der Körper dagegen leichter als Wasser (Fig. 191 b), so sinkt er nicht vollständig ein, sondern nur so tief, daß die von ihm verdrängte Wassermenge ebensoviel wiegt wie er selbst.

Ist ein Körper endlich schwerer als die gleiche Raummenge Wasser (Fig. 191 c), so sinkt er vollständig unter, so tief er kommen kann. Dabei verliert er einen Teil seines Gewichtes, während a und b ihr Gewicht vollständig verlieren.

Fig. 191.



Gewichtsverlust der Körper im Wasser.

Für alle drei Körper gilt nun der Satz, daß sie an Gewicht so viel verlieren, als die von ihnen verdrängte Wassermasse wiegt. Denn das übrige Wasser würde gerade diese Wassermassen tragen, und wenn die Körper von einer solchen Kraft nach oben gedrückt werden, so ist die Wirkung dieselbe, als ob sie entsprechend an Gewicht verloren hätten. Dieser wichtige Satz ist das sogenannte Archimedische Prinzip.

Beispiel 1. Ein Balken wiegt 60 kg. Wieviel Liter Wasser verdrängt er, wenn er frei schwimmt?

Beispiel 2. Ein Stein hat einen Rauminhalt von $^1/_4$ cbm. Wieviel leichter ist er im Wasser zu heben als in der Luft?

Beispiel 3. Ein Ei ist etwas schwerer als Süßwasser, aber etwas leichter als Salzwasser. Welches Verhalten zeigt es also in dem einen und in dem anderen Wasser?

§ 187. So hatte Archimedes in dem genannten Werke die richtige Grundlage für das Gleichgewicht der Flüssigkeiten ausgesprochen und selbst diese Grundlage benutzt, um die Bedingungen für das Gleichgewicht schwimmender Körper und den Satz vom Gewichtsverlust der Körper abzuleiten, allein das Werk blieb, wenn auch nicht unbeachtet, doch unverstanden, so daß die von Archimedes ausgesprochenen Sätze später von neuem aufgefunden werden mußten. Dies geschah gegen Ende des 16. Jahrhunderts durch Stevin (§ 132), der durch eine geniale Betrachtung die Hydrostatik, d. h. die Lehre vom Gleichgewicht und Druck des Wassers, begründete. Seine in holländischer Sprache verfaßte Schrift über diesen Gegenstand erschien 1585.

Zuerst sagt er: Ein kleines Wasserteilchen, welches sich selbst in einer größeren stillstehenden Wassermasse befindet, muß an jeder beliebigen Stelle im Gleichgewicht sein. Denn wäre dies nicht der Fall, so müßte es sich fortbewegen und ein anderes Teilchen würde an seine Stelle kommen. Dann würde aber auch dieses nicht im Gleichgewicht sein, es würde sich entfernen, wieder ein anderes würde an seine Stelle treten u. s. w. bis ins Unendliche. Das Wasser würde in ewiger Strömung begriffen, es würde ein

Digitized by Google

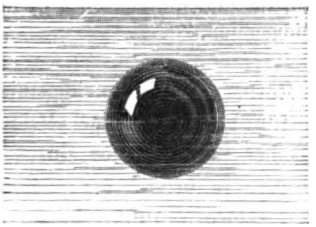
Perpetuum mobile sein, was eine Ungereimtheit ist. Dieser Teil der Betrachtung erinnert offenbar an Stevins Kette auf dem Dreieck. Aus der Betrachtung ergibt sich, daß ein Wasserteilchen, das sich im Wasser befindet, von dem übrigen Wasser getragen wird. Dazu ist aber eine nach oben wirkende Kraft, ein Auftrieb, erforderlich, der gleich dem Gewicht des Wasserteilchens ist.

Denkt man sich nun, das Wasserteilchen verwandle sich und werde fest oder es werde festgehalten, so würde das übrige Wasser doch in derselben Weise wie vorher drücken und denselben Auftrieb hervorbringen. Und wenn endlich der Inhalt des festgewordenen Körpers in einen schwereren oder leichteren verwandelt wird, so wird der Auftrieb doch nach wie vor derselbe sein.

Es ist beachtenswert, wie weit man mit diesen einfachen und unbestreitbaren Grundsätzen kommen kann. Sie sind tatsächlich zur Entwickelung der ganzen Hydrostatik ausreichend.

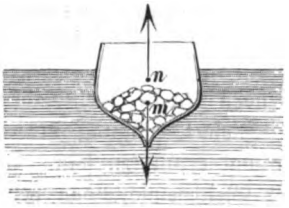
§ 188. Der Wasserteil V (Fig. 192) befindet sich in dem übrigen umgebenden Wasser im Gleichgewicht. Es muß also auf diesen Wasserteil ein

Fig. 192.



Der Auftrieb.

Fig. 193.



Ein schwimmender Körper (Querschnitt durch ein Schiff).

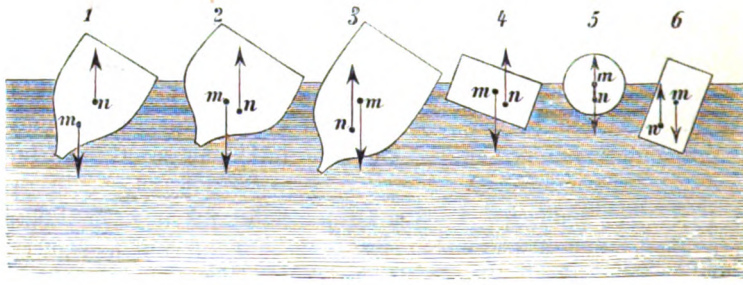
Druck nach oben, ein „Auftrieb", wirken, der gleich dem Gewicht des Wasserteils ist. Dies würde auch noch der Fall sein, wenn die Oberfläche von V zu einer festen Kapsel erstarrte. Denkt man sich ferner diese Kapsel mit Quecksilber, Blei, Stein, Zinn oder sonst irgend einer Substanz ausgefüllt, so wird der Auftrieb doch immer derselbe bleiben. Während also die Kapsel mit dem Gewicht ihres Inhaltes nach unten gezogen wird, wird sie mit einer Kraft, die gleich dem Gewicht der gleichen Raummenge Wasser ist, nach oben gedrückt (das Archimedische Prinzip), und je nachdem der Inhalt mehr, ebensoviel oder weniger wiegt als die gleiche Raummenge Wasser, wird der Körper sinken, schweben oder steigen.

§ 189. Diesem bereits von Aristoteles ausgesprochenen Satze fügte Stevin noch einige Sätze über schwimmende Körper hinzu. Der schwimmende Körper hat einen Schwerpunkt m (Fig. 193), und dieser strebt vertikal nach unten. Die verdrängte Wassermenge würde ebenfalls ihren Schwerpunkt gehabt haben, und dieser bildet den Angriffspunkt des Auftriebes. Wenn nun der schwimmende Körper im Punkt m nach unten und der Auftrieb im Punkt n ebenso stark nach oben wirkt, so wird der Körper nur dann im

Digitized by Google

Gleichgewicht sein können, wenn m und n in derselben Vertikallinie liegen. Was sodann die verschiedenen Arten des Gleichgewichtes betrifft (§ 128), so sagt Stevin, daß das Gleichgewicht nur dann beständig ist, wenn der Schwerpunkt des Körpers tiefer liegt als der Auftriebspunkt (der Schwerpunkt der verdrängten Wassermasse). Daß der Körper in diesem Falle im beständigen Gleichgewicht ist, ist leicht aus Fig. 194, 1 zu ersehen. Die in m und n

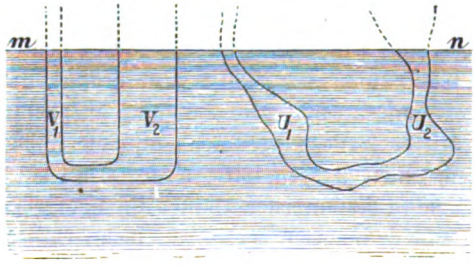
Fig. 194.



Schwimmende Körper im beständigen (1, 2, 4), im unbeständigen (3, 6) und im indifferenten (5) Gleichgewicht.

angreifenden Kräfte drehen den geneigten Körper in die Gleichgewichtslage zurück. Diese Bedingung braucht übrigens für das beständige Gleichgewicht nicht einmal erfüllt zu sein. Wenn nämlich der schwimmende Körper etwas aus der Gleichgewichtslage herausgedreht wird, so behält der Schwerpunkt des Körpers selbstverständlich seine Lage bei. Dagegen nimmt die verdrängte Wassermasse in der Regel eine andere Form an und infolge dessen ändert sich die Lage des Schwerpunktes der Wassermasse, d. h. des Auftriebspunktes. Nun kommt es darauf an, ob eine Kraft, die im Punkt n vertikal nach oben wirkt, zusammen mit dem Gewicht des Körpers, welches im Punkt m angreift, den Körper zurückdreht (Fig. 194, 2 und 4) oder noch weiter von der Gleichgewichtslage entfernt (Fig. 194, 3 und 4). Bei einer Kugel liegen die Punkte m und n immer in derselben Vertikallinie (Fig. 194, 5) und die Kugel ist daher stets im indifferenten Gleichgewicht.

Fig. 195.



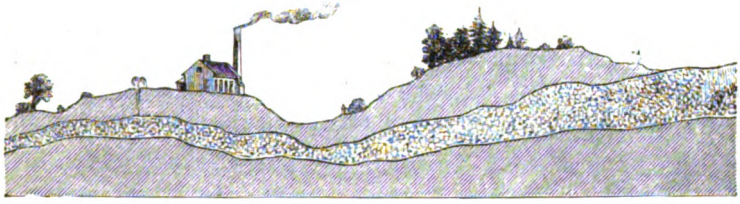
Gesetz der kommunizierenden Röhren (Stevin).

§ 190. Stevin stellte ferner die folgende Betrachtung an. Im Wasser, dessen Oberfläche mn ist (Fig. 195), kann man sich eine Wassermasse $V_1 V_2$, wie die Figur zeigt, begrenzt denken, und zwar zunächst so, daß die Be-

Digitized by Google

grenzung in keiner Weise die Wasserteilchen hindert, sich anzuordnen wie sie wollen. Kein Teil dieser Wassermasse wird das Bestreben haben, sich zu verschieben. Dies würde auch nicht der Fall sein, wenn die Begrenzung der Wassermasse plötzlich erstarrte. Wenn dies aber geschehen wäre, so könnte man selbstverständlich das außerhalb der Begrenzung befindliche Wasser entfernen, ohne daß der Gleichgewichtszustand des innerhalb der Begrenzung

Fig. 196.



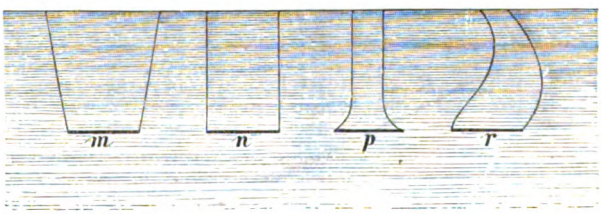
Artesische Brunnen.

befindlichen Wassers hierdurch irgendwie beeinflußt würde. Man hat dann sogenannte kommunizierende Gefäße oder kommunizierende Röhren, und in diesen steht das Wasser gleich hoch, d. h. in derselben horizontalen Ebene. Was von $V_1 V_2$ gesagt worden ist, kann Wort für Wort von $U_1 U_2$ gesagt werden, d. h. das Gesetz der kommunizierenden Röhren gilt für Gefäße von jeder beliebigen Form. Der Satz selbst war zur Zeit Stevins nicht unbe-

Fig. 197.

Druck auf eine Platte im Wasser.

Fig. 198.



Das hydrostatische Paradoxon (Stevin).

kannt. Archimedes hatte sogar schon die Erklärung gegeben, aber die eigentümliche Art, wie Stevin den Satz erklärt, verdient hervorgehoben zu werden.

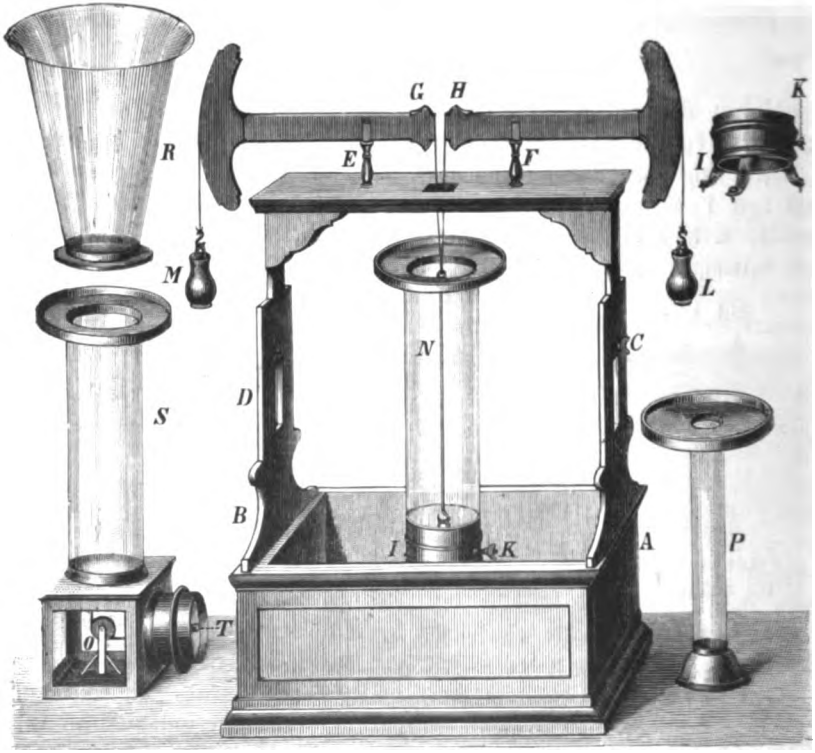
Auf dem Satz von den kommunizierenden Röhren beruhen die sogenannten artesischen Brunnen. Wenn eine Sandschicht oben und unten durch Lehm, Kalk oder ein anderes für Wasser undurchlässiges Material begrenzt wird (Fig. 196), so kann in einem Bohrloch das Wasser bis auf die Erdoberfläche und noch höher als diese emporsteigen.

§ 191. In ähnlicher Weise wie das Gesetz der kommunizierenden Röhren erklärte Stevin auch den Druck des Wassers auf Flächen. Zuerst wird darauf hingewiesen, daß eine horizontale Fläche ab im Wasser (Fig. 197) einen Druck erleiden muß, der gleich dem Gewicht eines Wasserzylinders $abcd$ ist,

Digitized by Google

dessen Grundfläche ab und dessen Höhe ad ist. Denkt man sich nämlich ab zu dem Boden eines großen Gefäßes erweitert, so muß der Boden die Wassermasse tragen, und jeder Teil (ab) des Bodens muß selbstverständlich den auf ihn entfallenden Teil dieser Wassermasse tragen. Denkt man sich nun gleich große horizontale Platten (Fig. 198, a. v. S.) m, n, p, r gleich tief unter der Oberfläche im Wasser, so muß der Druck auf alle diese Platten gleich groß sein, nämlich gleich dem Gewicht des über der Platte stehenden Wasserzylinders. Sodann denkt man sich einige Begrenzungsflächen von verschiedener Gestalt (siehe Figur), aber zunächst so, daß sich die Wasserteilchen beliebig anordnen können. Sie werden sich in derselben Weise anordnen und in derselben Weise gegen die Platten drücken wie vorher. Wenn nun die Begrenzungen plötzlich erstarrten, ohne sich im geringsten zu verschieben, so würde im Verhalten des

Fig. 199.



Die von Stevin erfundenen sogenannten Pascalschen Gefäße.

Wassers sich nichts ändern. Nimmt man endlich das außerhalb der Gefäße befindliche Wasser hinweg, so bleiben die Gefäße übrig, die alle bis zu derselben Höhe mit Wasser gefüllt sind, die aber verschiedene Gestalt haben. In allen diesen Gefäßen erleidet der Boden denselben Druck. So ist also bewiesen, daß der Druck auf den Boden eines mit Wasser gefüllten

Digitized by Google

Gefäßes nicht von der Form des Gefäßes, auch nicht von der im Gefäß enthaltenen Wassermenge, sondern nur von der Größe des Bodens des Gefäßes und von der Tiefe des Wassers abhängt. Der Druck ist gleich dem Gewicht des Wasserzylinders, der den Boden des Gefäßes zur Grundfläche und die Tiefe des Wassers zur Höhe hat. Da also mit einer großen Wassermasse ein kleiner und mit einer kleinen Wassermasse ein großer Druck auf den Boden eines Gefäßes ausgeübt werden kann, hat man diesen Satz das „hydrostatische Paradoxon" genannt.

§ 192. Um die Richtigkeit des Satzes durch den Versuch zu bestätigen, konstruierte Stevin den in Fig. 199 abgebildeten Apparat. Über dem Gefäß AB erhebt sich ein Galgen, der gehoben und gesenkt und durch die Schrauben C und D festgestellt werden kann. Die Stützen E und F tragen je einen Hebel, deren äußeres bogenförmiges Ende nach Belieben belastet werden kann. Die inneren Enden sind durch je eine Schnur mit der Stange N verbunden.

Auf dem Boden des Gefäßes steht ein niedriger Zylinder IK auf einem Dreifuß. In diesem gleitet ein gut schließender Kolben, der an der Stange N befestigt ist. Auf den Zylinder IK kann man der Reihe nach verschiedene Röhren aufschrauben, die mit dem Zylinder zusammen ein wasserdichtes Gefäß bilden. In der Figur ist der Fall abgebildet, daß ein zylindrisches Rohr auf IK aufgeschraubt ist. Wird dieses durch das Rohr P ersetzt, so hat man ein Gefäß mit demselben Boden, welches aber weiter oben enger ist als das erste Gefäß. Wird R aufgeschraubt, so hat man ein Gefäß, welches nach oben viel weiter ist als das zylindrische Gefäß.

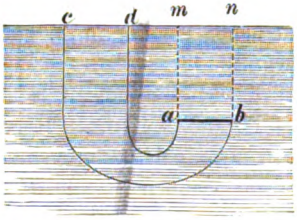
Versuche mit diesen Gefäßen zeigen nun, daß das Wasser, welches in das Gefäß gegossen werden muß, um den Gewichten L und M das Gleichgewicht zu halten, in allen drei Fällen dieselbe Höhe hat, daß es also an Menge sehr verschieden ist. Der Apparat wird gewöhnlich Pascalscher Apparat genannt, weil Pascal einen ähnlichen Apparat konstruiert und beschrieben hat, ohne von der Arbeit Stevins Kenntnis zu haben.

§ 193. Stevin zeigte ferner, daß der Druck auf eine kleine Fläche im Wasser immer derselbe ist, einerlei in welcher Lage sich die Fläche befindet. Ein Wasserteilchen muß nämlich von allen Seiten her denselben Druck erleiden, wenn man sich dasselbe so klein denkt, daß man von seinem Gewicht absehen kann. Befindet es sich z. B. an der Kante zwischen der Seitenwand und dem Boden eines Gefäßes, so muß es gegen die Seite ebenso stark wie gegen den Boden drücken. Dies kann vermittelst des Apparates S, Fig. 199, nachgewiesen werden, der an die Stelle des Gefäßes IKN gebracht wird. Die an den Hebeln G und H befestigte Schnur wird durch die Rolle O in horizontaler Richtung nach dem Kolben geführt. Dieser gleitet in einem Zylinder von derselben Größe wie IK. Es zeigt sich dann, daß der Seitendruck ebenso groß ist wie der Bodendruck, vorausgesetzt, daß soviel Wasser in das Gefäß gegossen wird, daß die Höhe des Wasserspiegels über der Mitte des Kolbens dieselbe ist wie früher die Höhe über der Kolbenfläche.

Digitized by Google

§ 194. Daß das Wasser auch einen Druck nach oben ausüben muß, ist ebenfalls leicht durch die von Stevin wiederholt angewandte Schlußfolgerung zu begründen. Die Platte *ab* (Fig. 200) erleidet von oben einen Druck, der gleich dem Gewicht der Wassermenge *abmn* ist. Die Platte *ab*

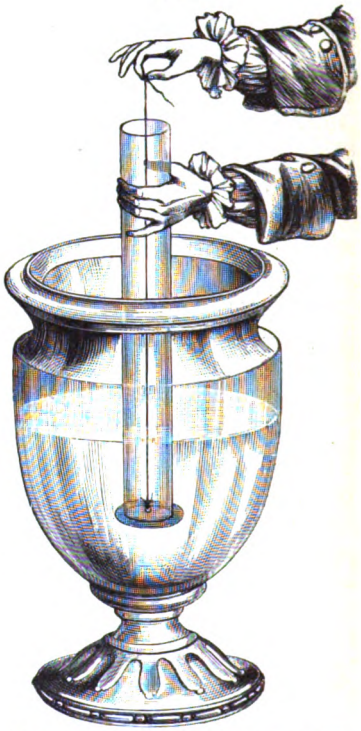
Fig. 200.



Stevins Wasserbegrenzung.

muß aber von unten einen ebenso großen Druck erleiden wie von oben, da sie sich sonst bewegen würde. Nun denkt man sich für die Wassermenge *abcd* eine Begrenzung, die zunächst die Bewegung nicht hindert und dann erstarrt, und schließlich denkt man sich das übrige Wasser entfernt. Dann hat man einen nach oben gerichteten Druck auf *ab*, der durch die Größe der Platte *ab* und deren Tiefe unter dem Wasserspiegel *mn* und also auch unter *cd* bestimmt ist.

Fig. 201.



Das von Stevin erfundene sogenannte Boylesche Ventil.

Stevin hat auch einen Apparat zur Veranschaulichung dieses Satzes ersonnen, der zuweilen mit Unrecht Boylesches Ventil genannt wird (Fig. 201). Eine am unteren Ende eben abgeschliffene Glasröhre wird durch eine Metallplatte verschlossen und in das Wasser eingetaucht. Die Metallplatte wird durch den Druck des Wassers am Herabfallen gehindert. Wenn man nun die Platte vorsichtig durch Schrotkörner u. dergl. belastet, bis sie abfällt, so kann man sich überzeugen, daß dies erst dann eintritt, wenn die Schrotkörner mit der Platte zusammen gerade so viel wiegen wie das Wasser, welches das Glasrohr bis zum Niveau des äußeren Wassers füllt. In der Figur ist ein Faden gezeichnet, vermittelst dessen man die Metallplatte festhalten kann, bis man das Rohr so tief in das Wasser eingetaucht hat, daß die Metallplatte durch das Wasser angedrückt wird.

§ 195. Durch diese Studien Stevins wurde die Hydrostatik, die seit der Zeit des Archimedes keine Fortschritte gemacht hatte, zu neuem Leben

Digitized by Google

erweckt. Und der berühmte holländische Wasserbauinspektor verstand es, aus der gegebenen Grundlage weitere Schlüsse zu ziehen, die für die Wasserbaukunst von großer Bedeutung waren.

§ 196. Durch eine geringe Menge Wasser, die in einem langen engen Rohr enthalten ist, kann man einen ungeheuer großen Druck hervorbringen. Verbindet man ein Faß mit einem solchen Rohr, führt es möglichst weit in die Höhe und füllt dann das Faß samt dem Rohr mit Wasser, so kann das Faß durch den Wasserdruck gesprengt werden. Jedes Quadratzentimeter der Seitenwand und des oberen Bodens des Fasses erleidet einen Druck, der ungefähr gerade so groß ist wie der Druck, den ein Quadratzentimeter des unteren Bodens erleidet, vorausgesetzt, daß das Rohr im Verhältnis zur Höhe des Fasses sehr lang ist.

Fig. 202 stellt einen ledernen Sack vor, welcher Wasser enthält. Der Sack ist mit einem nach oben gerichteten engen Rohr verbunden. Ein Mann steht auf einem Brett, welches auf dem Sack liegt, und treibt durch sein Gewicht das Wasser in dem Rohr in die Höhe. Das Wasser steigt aber durchaus nicht sehr hoch. Ist z. B. die Berührungsfläche zwischen dem Brett und dem Sack 10 qdm und das Gewicht des Mannes 75 kg, so wird das Wasser in dem Rohr nur auf die Höhe von 7,5 dm in die Höhe gedrückt, weil $10 \times 7{,}5 = 75$ cbdm Wasser 75 kg wiegen. Der auf dem Sack stehende Mann wird daher sein eigenes Gewicht dadurch heben können, daß er in das Rohr hineinbläst.

Fig. 202.

Ein Mensch, durch eine kleine Wassersäule im Gleichgewicht gehalten.

§ 197. Den Druck des Wassers gegen eine vertikale Fläche, z. B. eine Schleuse, erklärte Stevin in folgender Weise.

Der Seitendruck gegen die kleine Fläche a_1 (Fig. 203, a. f. S.) ist gleich dem Gewicht einer plattenförmigen Wassermasse, deren Grundfläche a_1 und deren Höhe gleich der Tiefe dieser Wassermasse unter der Oberfläche des Wassers $MP = MN$ ist. Die Fläche a_1 erleidet also einen Druck, als ob die Wassermasse $a_1 b_1$ einen Druck nach außen ausübte, der gleich dem Gewicht dieser Wassermasse ist. Ebenso ist der gegen a_2 gerichtete Druck gleich dem Gewicht der Wasserplatte $a_2 b_2$ u. s. w. Der Gesamtdruck gegen die Fläche $MNSR$ ist also gleich dem Gewicht des Wasserprismas $PMNSRO$.

Der Schwerpunkt dieses Prismas liegt natürlich in der Ebene UVY, die durch die Mitten der Kanten OP, RM und SN geht. Das Gewicht des

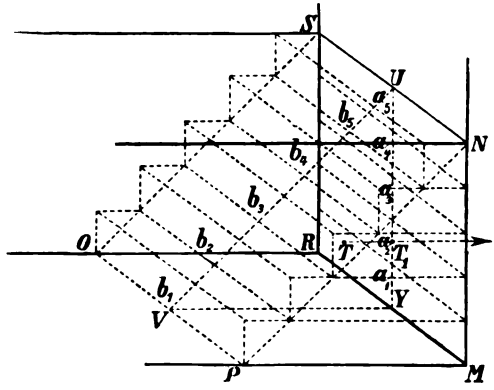
Digitized by Google

Prismas kann man sich gleichmäßig über das Dreieck UVY verteilt oder auch in dem Schwerpunkt dieses Dreiecks vereinigt denken. Die Höhe des Schwerpunktes T über VY ist aber gleich ein Drittel YU (§ 123). Fällt nun vom Schwerpunkt T die Senkrechte auf die Fläche $MNSR$, so ist der Fußpunkt T_1 dieser Senkrechten der sogenannte Mittelpunkt des Druckes, d. h. der Punkt, in welchem die Resultante der sämtlichen auf die einzelnen Teile der Fläche wirkenden Drucke angreift.

Beispiel. Eine Schleuse steht 2 m tief im Wasser und ist 1,2 m breit. Sie wird unten und in der Höhe des Wasserspiegels durch einen horizontalen Balken gestützt. Welchen Druck hat jeder der beiden Balken auszuhalten?

§ 198. Ohne die Arbeiten Stevins zu kennen, fand Galilei ähnliche Sätze der Hydrostatik wie Archimedes und Stevin. Er ging dabei von

Fig. 203.



Seitendruck auf eine Schleuse.

Fig. 204.

Fortpflanzung des Druckes in einer Flüssigkeit.

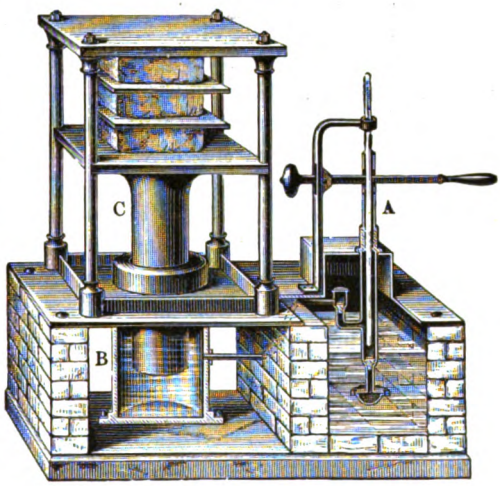
der Annahme aus, daß eine Flüssigkeit aus kleinen Kugeln besteht, die ebenso wie die Teile eines festen Körpers der Schwere unterworfen sind, die aber eine große Beweglichkeit besitzen, so daß sie dem geringsten Druck nachgeben. Indem Galilei seine Aufmerksamkeit besonders auf diese Eigenschaft der Flüssigkeiten richtet, schließt er, daß, wenn eine Flüssigkeit einen geschlossenen Raum, z. B. eine Flasche (Fig. 204) füllt und auf einen Teil der Oberfläche (durch den Stopfen) ein Druck ausgeübt wird, dieser Druck sich in der Flüssigkeit so fortpflanzt, daß jeder andere Teil der Oberfläche von derselben Größe denselben Druck erleidet. Daraus folgt, daß die Gesamtoberfläche der Flasche einen Druck erleidet, der sich zu dem auf den Stopfen ausgeübten Druck ebenso verhält wie die gesamte Oberfläche zum Querschnitt des Stopfens. Man kann daher eine gefüllte Flasche leicht durch einen Schlag auf den Stopfen sprengen. Wenn sich unter dem Stopfen Luft befindet, so wird durch diese die Wirkung des Stoßes abgeschwächt.

Galilei benutzte denselben Umstand zur Konstruktion einer sogenannten hydraulischen Presse, auf die er 1594 vom Dogen von Venedig ein 20jähriges

Digitized by Google

Patent erhielt. Die Galileische Presse hat jedoch keine nennenswerte Anwendung gefunden. Erst 200 Jahre später (1795) erhielt der englische Mechaniker Joseph Bramah (1749 bis 1814) in London ein Patent auf eine ähnliche Presse, die zum Zusammenpressen von Heu, Baumwolle u. dergl. dienen sollte. Daher wird die hydraulische Presse gewöhnlich Bramahsche Presse (Fig. 205) genannt. In einem engen, starkwandigen Zylinder *A* kann ein Pumpenkolben vermittelst eines Hebels bewegt werden. Der Zylinder steht durch ein enges Rohr mit einem weiten Zylinder in Verbindung, in dem sich der dicke zylindrische Preßkolben *C* bewegt. Ist nun z. B. der Durchmesser des engen Zylinders $^1/_{10}$ vom Durchmesser des weiten, so wird der weite Zylinder 100 mal so stark in die Höhe gedrückt, als der enge Zylinder herabgedrückt wird, also noch mehr als 100 mal so stark, als der Hebel am Handgriff niedergedrückt wird. Der Preßkolben bewegt sich natürlich nur um den hundertsten Teil der Strecke aufwärts, um die der Pumpenkolben abwärts gedrückt wird, weil in den weiten Zylinder nicht mehr Wasser hineinkommt, als aus dem engen herausgedrückt wird. Man sieht, daß das Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten auch für eine Maschine gilt, in der eine Flüssigkeit das mechanische Zwischenglied bildet.

Fig. 205.



Hydraulische Presse.

Um die Bewegung fortsetzen zu können, ist der enge Zylinder wie eine Pumpe mit Ventilen versehen, so daß man bei wiederholter Bewegung des Hebels immer neue Portionen Wasser aus dem engen Zylinder in den weiten drückt.

Die hydraulische Presse, mit der man einen ungeheuren Druck hervorbringen kann, findet in der Industrie vielfache Anwendungen. Sie dient zum Durchlochen von Eisenplatten, zum Zusammenpressen von verschiedenem Material, zum Prüfen der Stärke von Ketten, Dampfkesseln u. s. w.

Spezifisches Gewicht.

§ 199. Durch die vom König Hieron gestellte Aufgabe, betreffend die Untersuchung des goldenen Kranzes, sah sich Archimedes veranlaßt, Betrachtungen darüber anzustellen, was ein Körper mit Rücksicht auf sein Volum wiegt.

Digitized by Google

Ganz neu waren derartige Betrachtungen nicht. Daß manche Körper im Verhältnis zu ihrem Volum ein sehr hohes Gewicht haben, z. B. Gold, Blei, Quecksilber, hatte man lange gewußt. Man kannte sogar die Verschiedenheit des Gewichtes mancher Körper, die in dieser Hinsicht einander sehr nahe stehen. Der berühmte griechische Arzt Hippokrates (etwa 456 bis 366) gibt in einer seiner Schriften an, daß Regenwasser das leichteste Wasser ist. Daß es leichter als Meerwasser ist, ist verhältnismäßig leicht zu beobachten. Dagegen ist es zu verwundern, wie die alten Griechen mit ihren unvollkommenen Instrumenten finden konnten, daß es auch leichter als Brunnenwasser ist. Man ist versucht anzunehmen, daß man mehr auf spekulativem, als auf experimentellem Wege zu diesem Resultat gekommen war. Tatsache ist, daß man Regenwasser benutzte, um Hohlmaße nach dem Gewicht zu eichen.

§ 200. Archimedes gab seinen Vorgängern in mathematischer Strenge nichts nach, ja er übertraf sie sämtlich in der Behandlung schwieriger mathematischer und mechanischer Probleme, und die Spekulation hatte für ihn höheren Wert als das Experiment. Dennoch verschmähte er es nicht, die Ergebnisse seiner Gedankenarbeit praktisch zu betätigen. Ein lateinischer Schriftsteller aus der Zeit des Tiberius, der auch die Geschichte von dem goldenen Kranz des Königs Hieron erzählt, erwähnt in derselben Schrift ein schwimmendes Gewicht, welches in einer Flüssigkeit um so tiefer einsinkt, je leichter die Flüssigkeit ist. Es kann kaum einem Zweifel unterliegen, daß Archimedes, der ein so ausgezeichnetes Werk über schwimmende Körper geschrieben hat, auch von anderen Körpern außer dem Gold das spezifische Gewicht bestimmen konnte, und daß er andere Methoden kannte, als die, welche er bei dem goldenen Kranze anwandte.

Marino Ghetaldi (geb. 1566 in Ragusa, gest. 1609 als Gesandter der Republik Venedig in Konstantinopel) gibt in seinem 1603 erschienenen Werk „Promotus Archimedes" die spezifischen Gewichte von zwölf verschiedenen Stoffen an, nämlich von den sieben damals bekannten Metallen Gold, Silber, Quecksilber, Blei, Kupfer, Eisen und Zinn, sowie von Wasser, Wein, Honig, Essig und Öl. Die sogenannte „Bilanzetta", welche Galilei zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes erfunden haben soll, ist wahrscheinlich eine von den Vorrichtungen, zu deren Gebrauch bereits Archimedes Anweisung gegeben hat.

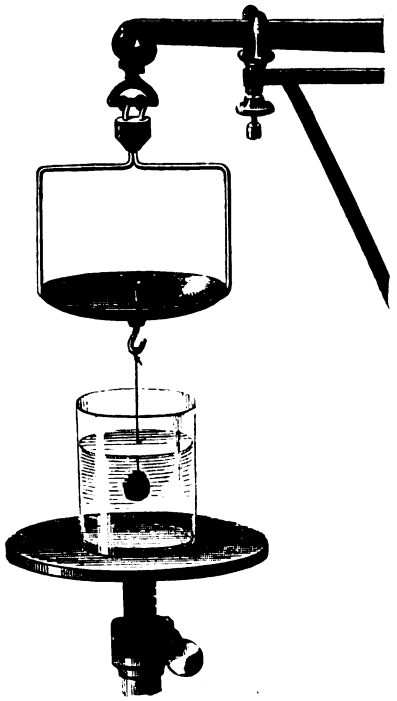
Die Bilanzetta wird als eine Art Schnellwage beschrieben, mit der man in der gewöhnlichen Weise das Gewicht eines Körpers in Luft, sowie das scheinbare Gewicht desselben ermitteln konnte, welches er hat, wenn er in Wasser schwebt. Wiegt ein Körper (z. B. ein Stück Blei) in der Luft 11 Pfund, im Wasser 10 Pfund, so muß er nach dem Archimedischen Prinzip ein Pfund Wasser verdrängen. Die 11 Pfund Blei nehmen also denselben Raum ein wie ein Pfund Wasser. Das spezifische Gewicht des Bleies ist 11 (genauer 11,4).

§ 201. Dies ist das allgemein gebräuchliche Verfahren, nach dem man das spezifische Gewicht fester Körper bestimmt. Will man die Bestimmung

Digitized by Google

mit einer feineren Wage ausführen, so wird an der einen Wagschale ein kleiner Haken angebracht (Fig. 206), an dem man den Körper aufhängt. Man ermittelt das Gewicht des Körpers in Luft und in Wasser. Das spezifische Gewicht des Körpers erhält man dann, indem man sein Gewicht durch den Gewichtsverlust in Wasser dividiert. Der Gewichtsverlust in Wasser ist nämlich gleich dem Gewicht der gleichen Raummenge Wasser.

Fig. 206.



Hydrostatische Wage.

Wenn ein Körper leichter als Wasser ist, so muß man zunächst einen schwereren Körper an der Wagschale aufhängen und, während er im Wasser schwebt, durch Tariergewichte (Schrot, Granaten u. dergl.) ins Gleichgewicht bringen. Legt man nun den leichten Körper auf die Wagschale, so kann man durch Auflegen von Gewichten auf die andere Schale sein Gewicht in der Luft finden. Wird dann der leichte Körper an den schweren festgebunden, so daß ihn dieser mit sich in das Wasser zieht, so muß man auf die Schale, an der der Körper hängt, so viel Gewichte auflegen, als dem Gewichtsverlust entsprechen. Auf diese Weise hat man also den Gewichtsverlust des Körpers in Wasser ermittelt.

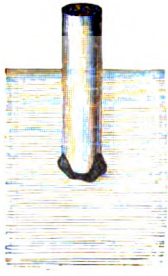
§ 202. Die Alten haben die Verschiedenheit der spezifischen Gewichte von Wein, Salzwasser, Regenwasser und Quellwasser wohl schwerlich durch Wägen gleicher Volume ermittelt, sondern wahrscheinlich an dem Verhalten schwimmender Körper auf den verschiedenen Flüssigkeiten erkannt. Es gibt verschiedene Stoffe, deren spezifisches Gewicht demjenigen des Wassers sehr nahe kommt. Bei derartigen Stoffen bedarf es daher oft nur einer ganz geringen Veränderung, um die schwimmenden in untersinkende und die untersinkenden in schwimmende zu verwandeln. Auch das Gewicht des menschlichen Körpers kommt dem Gewicht des Wassers sehr nahe, so daß das Schwimmvermögen im Meerwasser merklich größer ist als im Süßwasser. Auch wird das Schwimmvermögen merklich gesteigert, wenn man die Lungen durch Einatmen mit Luft füllt. Ein Ei schwimmt auf Salzwasser, sinkt aber in Süßwasser unter.

Hat man erst derartige Beobachtungen gemacht, so liegt es nahe, einen Schwimmer so einzurichten, daß man leicht beobachten kann, daß er in ver-

Digitized by Google

schiedenen Flüssigkeiten ungleich tief einsinkt. Dies Instrument — mag das in § 200 erwähnte von Archimedes erfunden worden sein oder nicht — hat jedenfalls ein Alter von einigen Tausend Jahren. Es hat einige Ähnlichkeit mit einem Kinderspielzeug, welches man an der Meeresküste antrifft. Es besteht aus einem Stückchen Schilf, welches an dem einen Ende durch Einklemmen eines Steinchens beschwert ist. Wird es in das Wasser geworfen,

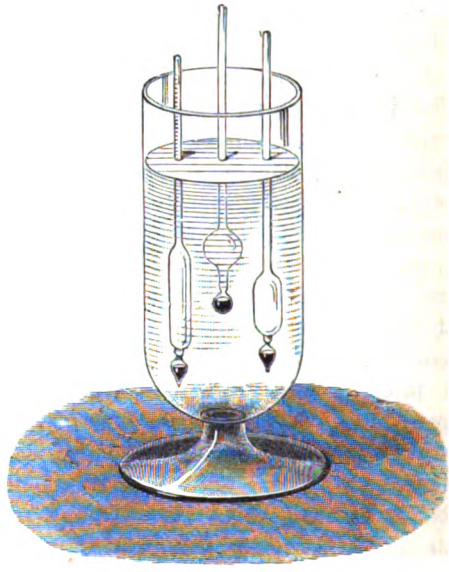
Fig. 207.



Schwimmer aus Schilf.

so schwimmt es in aufrechter Stellung und das freie Ende ragt aus dem Wasser hervor (Fig. 207).

Fig. 208.



Aräometer.

Um gut beobachten zu können, daß der Körper in verschiedenen Flüssigkeiten ungleich tief einsinkt, muß man den aus der Flüssigkeit hervorragenden Teil des Körpers recht dünn machen. Ein schwimmender Körper sinkt immer so tief ein, daß er so viel Flüssigkeit verdrängt als er selbst wiegt. Ein Körper von der angegebenen Form muß daher um ein beträchtliches Stück tiefer einsinken, wenn er nur wenig mehr Flüssigkeit verdrängen soll. Die Schwimmer (Aräometer) bestehen meist aus Glas und haben die aus Fig. 208 ersichtliche Form. Der kugelförmige Teil am unteren Ende enthält etwas Schrot oder Quecksilber. Der obere stielförmige Teil enthält die auf einen Papierstreifen gezeichnete Skala.

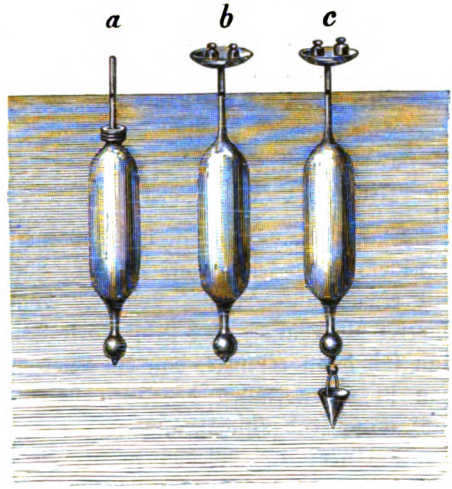
Die Teilung ist oft für eine bestimmte Flüssigkeit eingerichtet, z. B. Spiritus, der leichter als Wasser ist, oder für eine Zuckerlösung, eine Salzlösung, die schwerer als Wasser sind. Die Teilung kann dann ohne weiteres angeben, wieviel Teile Spiritus, Zucker oder Salz die Flüssigkeit enthält. Die Aräometer, welche für jede beliebige Flüssigkeit gebraucht werden sollen, besitzen eine Skala, an der man das spezifische Gewicht ablesen kann. Auch Aräometer mit ganz willkürlicher Teilung, wie das von Baumé (1728 bis

Digitized by Google

1804) sind, namentlich für technische Zwecke, vielfach in Gebrauch. Das einer gewissen Anzahl von „Graden“ dieses Aräometers entsprechende spezifische Gewicht muß aus einer Tabelle entnommen werden.

§ 203. Außer dem uralten Schwimmer gibt es noch ein anderes Instrument, welches auf einem anderen Prinzip beruht und welches man, wie man annimmt, der berühmten Accademia del Cimento verdankt. Es hat einige Ähnlichkeit mit dem erwähnten Aräometer, aber der stielförmige Teil desselben ist noch dünner (Fig. 209, a) und ist nicht mit einer Skala, sondern nur mit einer Marke versehen, bis zu welcher es durch Auflegen ringförmiger Gewichte in die Flüssigkeit eingesenkt wird. Es verdrängt also immer dasselbe Volum der Flüssigkeit, und es muß ermittelt werden, welches Gewicht in jeder Flüssigkeit erforderlich ist, um dies Volum zu verdrängen. Man muß daher das Gewicht des Instrumentes und auch die Größe der ringförmigen Zusatzgewichte kennen. Wiegt das Aräometer z. B. 60 g und sind 25 g Zusatzgewichte erforderlich, um das Instrument in Wasser, und 18 g, um es in Spiritus bis zur Marke einsinken zu lassen, so ist das Gewicht der verdrängten Wassermenge 85 g, das Gewicht der verdrängten Spiritusmenge 78 g. Also ist das spezifische Gewicht des Spiritus $^{78}/_{85} = 0{,}918$.

Fig. 209.



Aräometer der Accademia del Cimento (a), verbessert von Fahrenheit (b) und Nicholson (c).

Der Apparat wurde 1724 von Fahrenheit verbessert, der am oberen Ende des Stieles eine kleine Schale anbrachte (Fig. 209, b), auf welche die Gewichte aufgelegt werden. Hierdurch wird vermieden, daß das Volum des eingesenkten Teiles des Instrumentes verändert wird. Nicholson brachte dann 1787 am unteren Ende ein kleines Sieb an (Fig. 209, c), so daß derselbe Apparat auch zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes fester Körper benutzt werden konnte. Um das Gewicht des Körpers zu bestimmen, treibt man das Instrument durch Auflegen von Gewichten bis zur Marke ins Wasser, legt dann den Körper auf die Schale und nimmt so viel Gewichte hinweg, daß die Marke wieder an die Oberfläche des Wassers kommt. Dann bringt man den Körper in das Sieb. Die Gewichte, welche man nun auflegen muß, um das Instrument wieder bis zur Marke einzusenken, geben den Gewichtsverlust des Körpers im Wasser an.

§ 204. Das spezifische Gewicht findet bei vielen Berechnungen Anwen-

Digitized by Google

dung, z. B. wenn man bei bekanntem Volum eines Körpers das Gewicht desselben berechnen will. Für genaue Berechnungen muß man die spezifischen Gewichte aus einer ausführlichen Tabelle entnehmen oder durch Versuche (§ 201 bis 203) ermitteln. Es ist aber zu empfehlen, sich die angenäherten Werte der spezifischen Gewichte für einige Substanzen zu merken.

Kork	$^1/_4$
Holz, je nach der Art und der Trockenheit	$^1/_3$ bis $1^1/_3$
Die meisten Steine, Ton, Sand, Backstein, Glas	2 „ 3
Aluminium	$2^2/_3$
Eisen, Stahl, Zinn	7 bis 8
Kupfer	9
Silber	10
Blei	11
Quecksilber	14
Gold, Platin	20
Iridium	23

Wasserfreier Weingeist hat das spezifische Gewicht 0,8. Öle sind im allgemeinen etwas leichter als Wasser, Wein ist zum Teil etwas leichter, zum Teil etwas schwerer als Wasser. Wässerige Lösungen sind in der Regel schwerer als Wasser, aber selbst starke Lösungen selten schwerer als $1^1/_2$. Wenn man sich dann erinnert, daß ein Liter Wasser ein Kilogramm wiegt, so kann man in vielen Fällen das Gewicht einer gewissen Raummenge einer Substanz annähernd abschätzen.

Beispiel 1. Wieviel wiegt ein Backstein von 25 cm Länge, 12 cm Breite und 6,5 cm Dicke (deutsches Normalformat). **Beispiel 2.** Wieviel wiegt eine eiserne Achse von 6 m Länge und 10 cm Durchmesser? **Beispiel 3.** Welchen Raum nehmen 50 kg Kork ein? **Beispiel 4.** Ein Eichenstamm (spez. Gew. = 1) ist 5 m lang und 0,6 m dick. Welches ist sein Gewicht? **Beispiel 5.** Zu einem Blitzableiter wird eine Kupferstange von 20 m Länge und 1 cm Durchmesser gebraucht. Wieviel Kilogramm Kupfer? **Beispiel 6.** Ein Dach soll mit Bleiplatten von 2 mm Dicke belegt werden. Dachfläche 300 qm. Wieviel Kilogramm Blei? **Beispiel 7.** Ein 80 cm langes Glasrohr ist am Ende zu einer Kugel aufgeblasen. Rohr und Kugel sind mit Quecksilber gefüllt. Welchen Druck übt das Quecksilber auf jedes Quadratzentimeter der Kugelfläche aus? **Beispiel 8.** Eine Kirchturmspitze von 2 qm Oberfläche ist mit 2 g Gold vergoldet. Wie dick ist die Goldschicht?

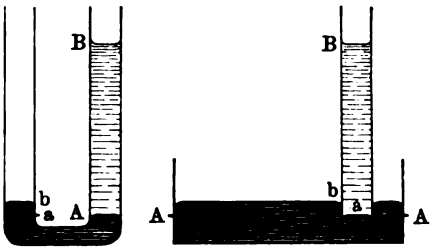
§ 205. Wenn mehrere Flüssigkeiten in einem Gefäß enthalten sind, so ordnen sie sich in horizontalen Schichten nach dem spezifischen Gewicht an, und zwar so, daß die schwerste die unterste Schicht bildet. Denn nur dann kann in jeder beliebigen Tiefe in jeder horizontalen Ebene überall derselbe Druck sein, was die Bedingung für das Gleichgewicht ist (§ 191). Auch wenn eine horizontale Wasserschicht auf einer Ölschicht läge, würden die Flüssigkeiten im Gleichgewicht sein, aber das Gleichgewicht würde unbeständig

Digitized by Google

sein und die allergeringste Störung würde zur Folge haben, daß das Öl als die leichtere Flüssigkeit vom Wasser in die Höhe gedrückt wird und die beiden Flüssigkeiten erst zur Ruhe kommen, wenn das Öl die obere und das Wasser die unterste Schicht bildet.

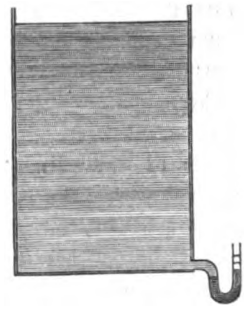
Befinden sich in kommunizierenden Röhren Flüssigkeiten von verschiedenem spezifischem Gewicht, und ist von der schwereren, z. B. Quecksilber, genug vorhanden, so daß die leichtere (Wasser) in dem einen Schenkel des Rohres abgesperrt ist, so muß, wie leicht einzusehen ist, das Wasser in diesem Schenkel höher stehen als das Quecksilber im anderen Schenkel, einerlei ob der Apparat aus einem U-Rohr oder aus einem offenen Rohr besteht, welches in einem weiteren Gefäß steht (Fig. 210). In der Ebene Aa muß nämlich

Fig. 210.



Flüssigkeiten mit verschiedenem spezifischem Gewicht in kommunizierenden Gefäßen.

Fig. 211.



Ein Faß mit Quecksilberverschluß.

überall gleicher Druck herrschen. Dies kann aber nur der Fall sein, wenn die Wassersäule AB und die Quecksilbersäule ab gleich stark drücken. Da aber der Druck bei A und bei a von der Breite und der Form der Flüssigkeitssäule unabhängig ist (§ 190) und nur von der Höhe derselben abhängt, muß die Säule AB sovielmal (14 mal) höher sein als ab, als das Quecksilber spezifisch schwerer als Wasser ist. Die Höhen verhalten sich umgekehrt wie die spezifischen Gewichte.

Beispiel. Ein Faß von 1 qm Querschnitt ist 1 m hoch mit Spiritus vom spez. Gew. 0,85 gefüllt (Fig. 211). Unten ist ein U-förmig gebogenes Rohr von 1 cm Querschnitt eingesetzt. Das Rohr enthält Quecksilber. Wieviel Zentimeter steht das Quecksilber im äußeren Schenkel des U-Rohres höher als im inneren? Wieviel Gramm wiegt dieses Quecksilber? Wieviel Kilogramm Spiritus sperrt es ab?

Wasser- und Luftkunst.

§ 206. Theorie und Praxis haben sich oft gegeneinander abweisend verhalten, die erstere im Bewußtsein ihrer allgemeinen Gültigkeit und ihres unvergänglichen Wertes für die Menschheit, die letztere mit dem Hinweis auf die handgreifliche Wirklichkeit als das einzige, auf das man sich verlassen kann und das Wert für das praktische Leben hat.

Digitized by Google

Zu Zeiten haben sich Theorie und Praxis auf eigene Hand kräftig entwickeln können, allein auf die Dauer konnte doch keine von beiden die befruchtende Einwirkung der anderen entbehren. Die griechischen Mathematiker und Philosophen gingen in dieser Hinsicht sehr weit. Sie leisteten daher wohl Großes auf ihrem Gebiete, allein sie verschmähten es, ihre Tätigkeit mit anderen bürgerlichen Beschäftigungen in Verbindung zu bringen, was eine gewisse Einseitigkeit zur Folge hatte. Es ist zu verwundern, wie wenig dieses sonst so scharfsinnige Volk die Naturwissenschaft gefördert hat. Dies erscheint jedoch begreiflich, wenn man bemerkt, daß sich nur sehr wenige von den griechischen Mathematikern mit Naturdingen beschäftigten. Wo aber eine solche Arbeit in Angriff genommen wurde, da wurden auch bedeutende Erfolge erzielt. Man braucht nur an Aristarch und Hipparch in der Astronomie und an Archimedes in der Mechanik zu denken. Archimedes war ein Meister der reinen Denkarbeit wie vielleicht kein anderer, und er eroberte durch reines Denken ganz neue Gebiete, wie die Gleichgewichtslehre, allein er verschmähte es auch nicht, seine Kenntnisse und Fähigkeiten bei der Belagerung von Syrakus zu verwerten. Er behandelte mit Vollkommenheit das Unendlichkleine, die krummen Linien und krummen Flächen, er schrieb über den Kreis, die Kugel, den Kegel und den Zylinder absolute Wahrheiten, die früher noch niemals ausgesprochen worden waren, er schreckte nicht vor der mühsamen Aufgabe zurück, den Kreis zu berechnen, obwohl er keine absolut genaue Zahl, sondern nur Annäherungen fand, auf die von den mehr sophistischen Mathematikern mit Geringschätzung herabgesehen wurde.

§ 207. Wir kommen jetzt zu einem anderen großen Mathematiker, der ebenfalls eine Ausnahme von der Regel bildet, Heron von Alexandria. Von seiner Person weiß man nicht viel. Er lebte um das Jahr 100 v. Chr. Sein Lehrer soll Ktesibios gewesen sein. Dieser war der Sohn eines Barbiers und betrieb anfangs das Handwerk seines Vaters, erfand aber eine ganze Anzahl physikalischer Apparate, eine Wasseruhr (§ 158), eine Wasserorgel, eine Druckpumpe und eine Wurfmaschine. Die letztere warf Kugeln vermittelst komprimierter Luft, war also eine Art Windbüchse. Ktesibios verdankt wahrscheinlich manche Anregung den Ägyptern, und möglicherweise besteht sein Verdienst bei den genannten Erfindungen zum Teil darin, daß er ägyptische Geheimnisse enthüllte und vielleicht in einen besseren Stil einkleidete.

Ein hoch begabter und origineller Mathematiker war sein Schüler Heron. Besonders bewundernswert ist die Art und Weise, wie er Theorie und Praxis zu verbinden verstand. So schrieb er ein Buch über Landmessung mit Dioptern, welches als das erste vollständige Lehrbuch dieses Gegenstandes angesehen wird. Die Ägypter, bei denen die Landmessung eine sehr wichtige Rolle spielte, übten diese Kunst selbst zur Zeit Herons nach einer veralteten Methode aus, die zuweilen zu ganz falschen Resultaten führte. Herons Werk bildete eine vollendete Anweisung für die praktische Ausführung der

Digitized by Google

Messungen sowie für die Berechnungen vermittelst geeigneter Formeln. So gibt er eine wahrscheinlich von ihm selbst gefundene Formel zur Berechnung des Inhaltes eines Dreiecks aus den Seiten[1]).

§ 208. Außer anderen Werken hat Heron ein Buch über Wasser- und Luftkunst geschrieben. Das Buch beginnt folgendermaßen: „Da die alten Philosophen und Mathematiker die Behandlung der Luft des sorgfältigsten Studiums für würdig erachtet haben, indem jene ihre Kraft und Eigenschaften mit dem Verstande behandelten, während diese ihre Wirkung auf die Sinne beobachteten, habe ich es für notwendig gehalten, aufzuschreiben, was darüber überliefert ist, und hinzuzufügen, was wir selbst gefunden haben. Hiermit wird denen, die Mathematik studieren wollen, am besten gedient sein, und außerdem . . . wird es teils für unser Leben notwendigen Nutzen bieten, teils große Verwunderung erregen."

Diese einleitenden Worte bezeichnen Heron als den, der die Erscheinungen sowohl erklären, als auch nutzbar machen will. Zugleich erfährt der Leser, daß ein Teil der Erfindungen nur von ihm gesammelt, ein anderer Teil dagegen von ihm gemacht worden ist, ferner, daß ein Teil dieser Erfindungen nützlicher, ein anderer Teil dagegen mehr unterhaltender Art ist.

Das Buch bezeichnet in mehr als einer Hinsicht einen großen Fortschritt. Es ist das erste Mal, daß ein griechischer Mathematiker ein Werk schreibt, um materiellen Nutzen zu stiften, ohne jedoch die Forderung des Verständnisses fallen zu lassen. Es ist ferner das erste Mal, daß die alte Eimerkunst durch ein neues technisches System der Behandlung des Wassers abgelöst wird, ein System, von dem Einzelheiten schon vor Heron (in Ägypten und bei Ktesibios) vorhanden waren, das aber durch seine eigenen Arbeiten ergänzt, sich in seinem Buche als ein ganz neues System darstellt.

§ 209. Endlich bezeichnet das Buch einen bedeutenden Fortschritt, weil Heron das neue technische System auf eine Theorie gründet, die zwar auch nicht absolut neu ist, von der sich vielmehr schon Teile bei Aristoteles finden, die aber hier zum ersten Mal mit einer Klarheit entwickelt und in zahlreichen Einzelheiten verwendet wird, daß sie sich als etwas ganz neues darstellt. Die Theorie ist in folgenden Sätzen enthalten, die unmittelbar auf die angeführte Einleitung folgen: „Bevor wir zu dem übergehen, was gesagt werden soll, müssen wir „das Leere" behandeln. Einige behaupten, daß es eine Leere überhaupt nicht gibt, andere, daß eine Leere nicht einen ganzen Raum ausmachen könne, sondern daß sie in kleinen Teilen zwischen Luft und Wasser und Feuer und andere Körper eingesprengt ist, eine Ansicht, der wir vor anderen den Vorzug geben, da sie sich sowohl für den Augenschein, als auch für die Überlegung als richtig erweist. Denn Gefäße, die vielen als leer erscheinen, sind nicht leer, sondern mit Luft angefüllt. Nach der

[1]) Sind die drei Seiten eines Dreiecks a, b, c und der halbe Umfang s, dann ist der Inhalt:

$$\sqrt{s\,(s-a)\,(s-b)\,(s-c)}.$$

Digitized by Google

Meinung derjenigen, welche die Natur studieren, besteht aber die Luft aus kleinen leichten Körpern. Und wenn man Wasser in ein Gefäß gießt, welches leer erscheint, so entweicht ebenso viel Luft aus dem Gefäß, als Wasser hineinkommt. Von dem Gesagten kann man sich in folgender Weise überzeugen. Wenn man nämlich ein Gefäß, welches anscheinend leer ist, umgekehrt in Wasser eintaucht, so dringt das Wasser nicht in das Gefäß ein, auch nicht, wenn es vollständig untergetaucht wird. Es ist also augenscheinlich, daß die Luft, ganz so als ob sie ein Körper wäre, das Wasser nicht in das Gefäß eindringen läßt, weil der ganze Raum im Gefäße mit Luft angefüllt ist. Wenn man aber in den Boden des Gefäßes ein Loch bohrt, so dringt das Wasser durch die Mündung ein, während die Luft durch das Loch entweicht. Zieht man dagegen das eingetauchte Gefäß, ohne den Boden zu durchbohren, aus dem Wasser und wendet es um, so bemerkt man, daß die innere Oberfläche frei von Feuchtigkeit und rein ist, wie sie vor dem Eintauchen war. Daher muß die Luft als ein Körper betrachtet werden. Und sie erzeugt Wind, wenn sie in Bewegung kommt, denn Wind ist nichts anderes als bewegte Luft. Wenn man daher die Hand vor das in den Boden des Gefäßes gebohrte Loch hält, so fühlt man, daß Wind aus dem Gefäße ausströmt, während das Wasser eindringt. Aber es ist nichts anderes als Luft, die durch das Wasser herausgetrieben wird, und man muß nicht denken, daß das Leere selbst ein Ganzes bildet. Dieses ist in seinen Teilen im Feuer, im Wasser und in anderen Körpern verteilt, es sei denn, daß man vielleicht annehmen will, daß der Diamant frei von Leeren ist, da er weder geglüht noch zerbrochen werden kann und da er ganz bleibt, wenn man ihn zwischen Amboß und Hammer schlägt. Dies ist jedoch schwerlich deshalb der Fall, weil er ganz frei von Leeren ist, sondern infolge seiner durchgehenden Dichte. Da die Teilchen des Feuers größer sind als die Leeren des Steines, können sie nicht in diesen eindringen, sondern nur die äußere Oberfläche desselben berühren."

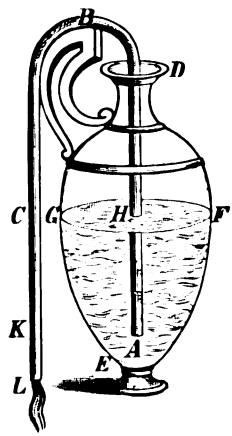
Nach der Ansicht Herons existiert also kein großer Raum, der leer ist. Wo kein Wasser und kein anderer sichtbarer Körper ist, da ist Luft, und die Luft ist auch ein Körper, ebenso das Feuer. Aber alle Körper sind porös, d. h. sie besitzen eine Menge kleiner Leeren, nicht nur die Luft, sondern auch andere Körper. Wenn die Körper glühend werden, so werden nach Herons Ansicht die Leeren vom Feuer durchdrungen, und das Feuer ist ebenfalls ein Körper. Auch der Diamant, von dem man damals glaubte, er könne nicht glühend gemacht werden, ist nach Herons Ansicht porös, aber die Poren sind so fein, daß das Feuer nicht eindringen kann und daß er nicht zwischen Hammer und Amboß zusammengedrückt werden kann. Um die Porosität der Körper zu beweisen, sagt Heron: „Wie sollte das Licht oder die Wärme oder eine andere körperliche Kraft durch das Wasser oder die Luft oder einen anderen Körper dringen können?" Ebenso findet er einen Beweis für die Porosität des Wassers und des Weines darin, daß sie sich vollständig miteinander mischen können, d. h. daß jede der beiden Flüssigkeiten in die Poren

Digitized by Google

der anderen eindringen kann. Und wenn Körper zusammengedrückt oder ausgedehnt werden, so sind es nur diese Poren, welche verkleinert oder vergrößert werden, während die Teilchen der Körper sich weder verkleinern noch vergrößern lassen. Wenn aber keine äußere Kraft auf einen Körper einwirkt, so nimmt er stets seinen natürlichen Raum ein. Blasen wir daher in eine Flasche und verschließen sie sofort mit dem Finger, so ist außer der ursprünglichen Luft zugleich die Luft in der Flasche, welche wir hineingeblasen haben, und die Poren müssen daher wie die Maschen eines zusammengedrückten Schwammes verkleinert worden sein. Wird aber der Finger hinweggenommen, so tritt ein Teil der Luft aus, so daß die zurückgebliebene Luft ihren natürlichen Raum einnehmen kann, indem die Poren ihre ursprüngliche Größe annehmen. Wenn man von der in der Flasche enthaltenen Luft etwas heraussaugt, so werden die Poren der zurückgebliebenen Luft in einer für sie unnatürlichen Weise vergrößert. Sie streben daher sich zusammenzuziehen und ziehen infolgedessen die Haut des Fingers in die Öffnung, und wenn der Finger entfernt wird, so ziehen sie sich zusammen, während von außen Luft eindringt.

§ 210. Mit Hilfe dieser Theorie erklärt Heron alle Apparate und Maschinen, die er in seinem monumentalen Werke beschreibt, welches sozusagen den Beginn einer neuen Aera der Wassertechnik bezeichnet. Die alte Eimerkunst wird durch Pumpen, Spritzen, Heber u. dergl. abgelöst, alles auf Grund des Satzes, daß die Luft ein Körper ist und daß die Leere keinen größeren Raum einnehmen, sondern nur in Gestalt von Poren existieren kann. Unter der Herrschaft dieser Theorie wurde die „Wasser- und Luftkunst" 1700 Jahre lang ausgeübt. Wenn sie erst nach Ablauf einer so langen Zeit von einer anderen Theorie abgelöst werden mußte, so ist dies ein Zeugnis dafür, daß eine Theorie wohl geeignet sein kann, die Erscheinungen im Zusammenhang aufzufassen und zu „verstehen", daß aber die Richtigkeit der Theorie keineswegs durch diese Erscheinungen bewiesen wird, daß vielmehr eines Tages neue Erscheinungen bekannt werden können, die sich durch die Theorie nicht erklären lassen. Dann muß man sich nach einer neuen Theorie umsehen.

Fig. 212.



Der Heber.

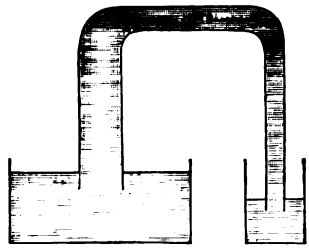
§ 211. Der erste Apparat, den Heron beschreibt und erklärt, ist der Heber. Ein gebogenes Rohr $ABCKL$ (Fig. 212) steht mit dem einen Schenkel in einem Gefäß DE, welches bis auf die Höhe FG mit Wasser gefüllt ist. Im inneren Schenkel steht das Wasser ebenso hoch wie im Gefäß. Saugt man nun bei L mit dem Mund einen Teil der Luft aus dem Rohr, so werden die Poren in der zurückgebliebenen Luft vergrößert. Die so ausgedehnte Luft strebt ihren natürlichen Raum einzunehmen und zieht daher in

Digitized by Google

dem Rohr Wasser in die Höhe. Wenn eine hinreichende Menge Luft durch Saugen entfernt wird, so füllt das Wasser nicht nur den Schenkel HB, sondern auch den Schenkel BC. Wenn es nun nicht weiter als bis C käme, so würde das Wasser ähnlich wie ein Gewicht aufgehängt sein. Das Wasser würde in beiden Schenkeln abwärts streben, aber es kann sich nicht an der höchsten Stelle des Hebers teilen, da kein größerer leerer Raum existieren kann. Wenn dagegen bei B ein Loch in das Rohr gebohrt würde, so würde das Wasser in jedem Schenkel herablaufen, während die Luft durch das Loch eindringt. Wenn kein Loch gebohrt wird, so können die beiden Flüssigkeitssäulen nur dann im Gleichgewicht sein, wenn C genau in gleicher Höhe mit F und G liegt. Liegt C etwas höher, so zieht das Wasser im inneren Rohr das Wasser im äußeren Rohr nach sich. Liegt C dagegen etwas tiefer, so zieht die äußere Wassersäule die innere mit sich fort und zwar so lange, als das Ende L des Rohres tiefer liegt als die Oberfläche des Wassers im Gefäß und so lange das Wasser nicht unter das Ende A des inneren Schenkels gesunken ist.

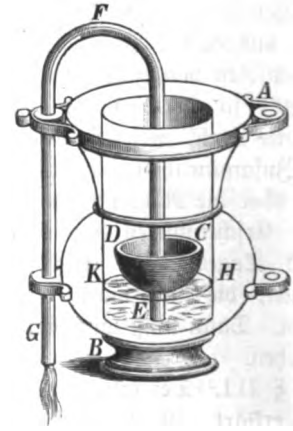
Während Heron so vom Gleichgewicht zwischen den Wassermassen in den beiden Röhren spricht, scheint es ihm doch nicht entgangen zu sein, daß seine Erklärung leicht mißverstanden werden kann. Er fügt nämlich hinzu, daß man nicht glauben dürfe, man könne das Wasser in dem Gefäß dadurch zum Ausfließen durch den Heber bringen, daß man den äußeren Schenkel weiter, dafür aber kürzer mache als den inneren, so daß er über der Oberfläche des

Fig. 213.



Herons Erklärung des Hebers.

Fig. 214.



Heber mit gleichförmigem Ausströmen.

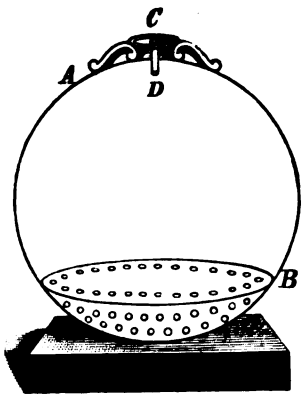
Wassers FG ende, in der Meinung, daß die größere Wassermenge im äußeren Schenkel die geringere Menge im inneren Schenkel nach sich ziehen würde, obgleich die letztere höher ist. Mit Rücksicht auf die Möglichkeit eines solchen Mißverständnisses bemerkt Heron ausdrücklich, daß das Wasser nach innen läuft, wenn die äußere Mündung höher als FG liegt, selbst wenn das äußere Rohr weiter als das innere ist. Er erklärt diese Tatsache in folgender Weise. Die freie Oberfläche aller Wassermassen auf der Erde, die miteinander in Verbindung stehen, müssen nach Archimedes eine Kugelfläche bilden, deren

Digitized by Google

Mittelpunkt mit dem Mittelpunkt der Erde zusammenfällt. Füllt man nun eine U-förmig gebogene Röhre vollständig mit Wasser, hält die Enden zu, stellt sie umgekehrt mit jedem Schenkel in ein Gefäß mit Wasser (Fig. 213) und entfernt dann die Finger, so kann sich das Wasser in der Röhre nicht teilen, weil kein leerer Raum entstehen kann. Das in der Röhre enthaltene Wasser bildet also die Verbindung zwischen den beiden Wassermassen in den Gefäßen. Das Wasser wird also nicht eher im Gleichgewicht sein, als bis die beiden Wasseroberflächen in derselben Kugelfläche um den Mittelpunkt der Erde, d. h. in derselben horizontalen Ebene liegen. Folglich muß das Wasser in denjenigen Schenkel eindringen, der in dem Gefäß mit dem höheren Wasserspiegel steht, selbst wenn dieser Schenkel der weitere ist. Es ist also nicht die Wassermenge in den Röhrenschenkeln, von der das Gleichgewicht abhängt, sondern nur die Höhe des Wassers (vergl. Stevins Satz von den kommunizierenden Röhren, § 190).

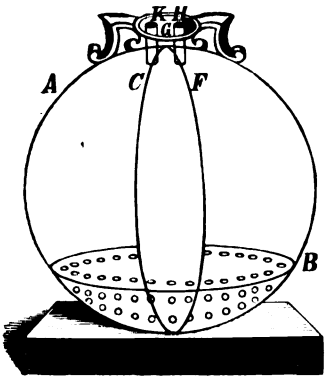
§ 212. Da ein Heber den Wasserstand in einem Gefäß zum Sinken bringt, strömt das Wasser nach und nach immer langsamer durch den Heber. Um den Wasserstrom gleichförmig zu machen, konstruierte Heron den Apparat Fig. 214. Der innere Schenkel des Hebers steckt in dem Boden einer Schale CD, in dem er wasserdicht befestigt ist. Diese Schale schwimmt auf dem Wasser in dem Gefäß und folgt also der Wasseroberfläche, wenn diese sinkt,

Fig. 215.



Herons Metallkugel.

Fig. 216.



Herons Zauberkugel.

so daß der Heber, der durch zwei Ringe am Gefäß geführt, aber nicht festgehalten wird, ebenso viel wie der Wasserspiegel sinkt. Die Mündung des äußeren Schenkels bleibt daher immer gleich tief unter der Oberfläche des Wassers.

Das letztere würde man viel leichter erreichen, wenn man anstatt der Schale CD ein Stück Kork an dem einen Schenkel des Hebers befestigte.

§ 213. Heron beschreibt eine aus Metall (Kupfer) gearbeitete Kugel (Fig. 215), die am Boden siebartig durchlöchert und oben mit einem kurzen Rohr CD versehen war, welches man mit dem Finger verschließen

Digitized by Google

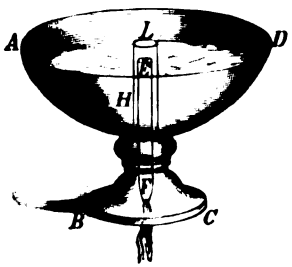
konnte. Taucht man die Kugel in Wasser ein, während das Rohr *CD* offen ist, so dringt das Wasser von unten her in die Kugel ein, während die Luft oben durch das Rohr entweicht. Wenn nun *C* mit dem Finger verschlossen und die Kugel aus dem Wasser gehoben wird, so läuft das Wasser nicht aus, weil kein luftleerer Raum entstehen kann. Entfernt man aber den Finger von der Öffnung *C*, so läuft das Wasser durch die Öffnungen im Boden aus. — Ein ähnlicher Apparat (Fig. 216, a. v. S.), den Heron beschreibt, hatte eine vertikale Scheidewand und oben zwei Röhren, auf jeder Seite der Scheidewand eine. Man kann nun jede der beiden Hälften des Gefäßes mit einer anderen Flüssigkeit, z. B. die eine mit Wasser und die andere mit Wein füllen, und dann, indem man entweder die eine oder die andere Röhre öffnet, nach Belieben die eine oder die andere Flüssigkeit ausfließen lassen.

Der erste dieser Apparate findet sich in unseren Tagen als der sogenannte Stechheber oder die Pipette (Fig. 217) wieder, aus welchem man die aufgenommene Flüssigkeit an beliebiger Stelle und in beliebigen Mengen auslaufen lassen kann.

Fig. 217.

Stechheber.

Fig. 218.



Zauberbecher.

Der andere Apparat wird in einer etwas abgeänderten Form von Taschenspielern benutzt, um aus derselben Flasche verschiedene Sorten Wein zu schenken. Der innere Raum der Flasche besteht aus verschiedenen Abteilungen, deren jede für sich durch den Flaschenhals entleert werden kann, wenn man die Flasche neigt und zugleich den Finger von einer Öffnung, die nach der betreffenden Abteilung führt, entfernt.

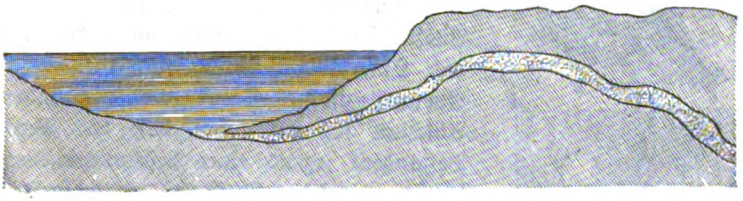
§ 214. Ein anderer Apparat, den Heron beschreibt, ist der Zauberbecher (Fig. 218). Auf dem Boden eines Bechers steht ein Rohr, welches oben geschlossen ist, aber unten kleine Öffnungen besitzt, durch welche das Wasser eindringen kann. Im Innern dieses Rohrs befindet sich ein anderes, an beiden Enden offenes Rohr. Das untere Ende dieses Rohrs geht wasserdicht durch den Boden des Gefäßes, während das obere Ende nahezu an das obere Ende des einschließenden Rohres heranreicht. Wenn man nun Wasser in den Becher gießt, so dringt es auch in das Rohr *HL* ein. Aber erst wenn der Becher beinahe voll ist, steigt das Wasser in dem Rohr so hoch, daß es von oben in das innere Rohr eindringt. Dann wirken aber die beiden Röhren als Heber und das Ausfließen des Wassers dauert so lange, bis der Becher leer ist.

In derselben Weise werden die intermittierenden Teiche erklärt, d. h.

Digitized by Google

Teiche, in denen das Wasser (während der Regenzeit) bis zu einer gewissen Höhe steigt, dann aber wieder sinkt, bis der Teich vollkommen leer ist. Von dem Boden des Teiches führt eine wasserführende Schicht nach einer tiefer gelegenen Stelle, nachdem sie vorher zwischen wasserdichten Schichten bis auf eine gewisse Höhe gestiegen ist. Diese wasserführende Schicht ist als ein Heber zu betrachten, der anfängt zu wirken, sobald er mit Wasser gefüllt ist, bis also das Wasser in dem Teich auf die erforderliche Höhe gestiegen ist.

Fig. 219.



Intermittierender Teich.

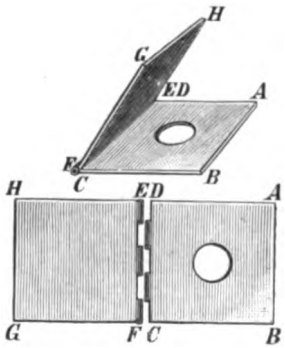
§ 215. Heron beschreibt in den 76 Abschnitten seines Buches eine Menge Vorrichtungen, die meist zur Ausführung von Versuchen unterhaltender Art dienen. Er läßt künstliche Vögel singen, indem er Luft, die durch Wasser zusammengedrückt ist, durch eine Flöte ausströmen läßt. Er beschreibt einen Baum, auf dem sich ein Drache befindet und in dessen Nähe ein Herkules mit einem Pfeil auf dem Bogen steht. Wenn man einen Apfel, der unter dem Baum liegt, aufhebt, zieht man an einer Schnur, der Herkules schießt den Pfeil auf den Drachen ab, und dieser stößt einen Schrei aus. Diese und ähnliche Automaten, welche durch Wasserdruck in Bewegung gesetzt werden, deuten darauf hin, daß die von Ktesibios erfundene Wasseruhr bei Heron angefangen hatte, sich zu den Wasserautomaten zu entwickeln, die im 9. Jahrhundert durch die Vermittelung der Araber ihren Einzug in Europa hielten (§ 158). Zur Entwickelung der Naturwissenschaft hat dies wohl wenig beigetragen, etwas mehr vielleicht zur Entwickelung der Geschicklichkeit in der Konstruktion von Instrumenten. — Von anderen Automaten, die durch Feuer in Bewegung gesetzt wurden, wird später die Rede sein.

§ 216. Im zehnten Abschnitt des Buches beschreibt Heron das Ventil, welches seit jener Zeit eine sehr wichtige Rolle gespielt hat, und aus der Weitläufigkeit, mit der dieser einfache Apparat beschrieben wird, kann man schließen, daß das Ventil damals etwas neues war. Die Beschreibung lautet folgendermaßen: „Man verfertigt zwei vierkantige Metallplatten (Fig. 220, a. f. S.) von geeigneter Dicke, die in beiden Richtungen etwa einen Finger lang sind. Diese werden mit den Flächen aneinander angepaßt und so geschliffen, daß weder Luft noch Wasser zwischen ihnen sein kann. Die Platten seien *ABCD* und *EFGH*. In die eine derselben, nämlich *ABCD*, ist ein rundes Loch von einem Drittel Finger Durchmesser gebohrt. Die Kante *CD* ist durch ein Scharnier mit der Kante *FE* verbunden, so daß die abgeschliffenen Seiten

Digitized by Google

der Metallplatten aufeinander fallen. Will man sie gebrauchen, so wird die Platte $ABCD$ in die Öffnung festgelötet, durch welche Luft oder Wasser in ein Gefäß hineingedrückt werden soll. Denn beim Hineindrücken geht die Platte $EFGH$ auf und läßt die Luft oder das Wasser eintreten. Durch den Druck der Luft oder des Wassers wird dann die Platte $EFGH$ gegen die Öffnung gedrückt, durch welche die Luft oder das Wasser eingetreten ist."

Fig. 220.



Das Ventil.

Sehr merkwürdig ist, abgesehen von der Ausführlichkeit der Beschreibung, der Umstand, daß Heron das Ventil als einen besonderen Apparat anführt. Die Beschreibung bildet einen Abschnitt für sich, ohne daß das Ventil als Bestandteil irgend eines bestimmten Apparates bezeichnet wird. Auch die zunächst folgenden Apparate sind nicht mit Ventilen versehen. Erst in späteren Abschnitten des Werkes kommen solche Apparate vor, und hier wird das Ventil als etwas aus früheren Abschnitten Bekanntes erwähnt.

Dies erinnert an das bei den griechischen Mathematikern allgemein gebräuchliche Verfahren, mit den einfachen Dingen zu beginnen, die für sich allein eine Art Ganzes bilden, und dann später zu den Dingen überzugehen, die aus den einfachen zusammengesetzt sind. Jedenfalls beweist diese Beschreibung bei Heron, daß er das Ventil nicht als eine Vorrichtung betrachtet hat, die zufälligerweise zu einer Feuerspritze gehört, sondern als einen Apparat von allgemeiner Anwendung, wenn es sich darum handelt, Luft oder Wasser in ein Gefäß hineinzupressen oder in einem solchen abzusperren.

Die heute bei Pumpen u. dergl. gebräuchlichen Ventile zeigen im wesentlichen dieselbe Einrichtung, nur besteht das feste Stück $ABCD$ gewöhnlich aus einem einfachen Stück Eisen oder Holz mit einer Öffnung, und die Klappe $EFGH$ aus einem Stück Leder, welches an der einen Seite befestigt ist. Um der Bewegung der Lederklappe eine größere Sicherheit zu geben, ist sie oft oben oder auch oben und unten durch eine hölzerne oder eiserne Scheibe verstärkt, so daß der Verschluß nur durch den von der unteren Scheibe nicht bedeckten Rand der Lederscheibe bewirkt wird (vergl. Fig. 226 und 227).

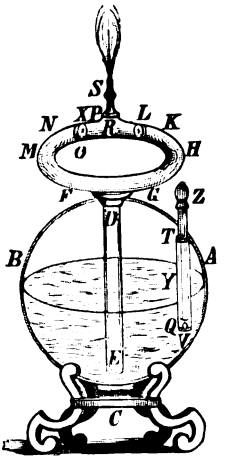
§ 217. Aus Herons Werk geht nicht hervor, daß der Begriff „Hahn" zu seiner Zeit bekannt war. Heron beschreibt zwar an verschiedenen Stellen etwas, was als Hahn bezeichnet werden könnte, aber er beschreibt es bei verschiedenen Apparaten in abweichender Weise. Es ist beachtenswert, wie schwer es gewesen sein muß, von den vielen einzelnen Vorrichtungen, die alle zu demselben Zwecke dienten, zu einer allgemeinen Auffassung und einer gemeinsamen Benennung überzugehen, da selbst ein Mathematiker wie Heron sich nicht eines gemeinsamen Namens bedient. Heutzutage sind wir gewohnt,

Digitized by Google

den Hahn als eine besondere Vorrichtung zu betrachten, auch da, wo er einen Teil einer zusammengesetzten Maschine bildet. Bei dem folgenden Apparat finden wir eine Vorrichtung, deren Wirkung man viel einfacher durch einen Hahn hervorbringen kann.

§. 218. Heron beschreibt eine Hohlkugel, aus der eine Flüssigkeit von selbst auf eine große Höhe herausspritzen kann, bis die Kugel vollständig geleert ist. Eine starke Kugel AB (Fig. 221) auf dem Fuß C hat oben eine Öffnung. In diese ist ein Rohr DE eingelötet, welches bis fast auf den Boden reicht. Oben verzweigt es sich in die Röhren GHL und FMX, die bei L und X enden und nur eine enge Öffnung besitzen. Zwischen diesen ist das Rohr XRL mit dem Seitenrohr RS angebracht. Auch dieses Rohr hat an jedem Ende eine kleine Öffnung, die auf die Öffnungen in dem anderen Rohr passen, wenn RS nach oben gewendet ist, die aber nicht auf diese Öffnungen passen, sondern sie verschließen, wenn das Rohr XRL mit RS nach unten gedreht wird. In die Kugel ist ferner das Rohr TV festgelötet. Dieses Rohr ist unten durch ein Ventil verschlossen, welches sich in die Kugel hinein öffnet. In das Rohr TV kann die wasserdicht schließende Stange Z hineingedrückt werden. Man gießt zuerst durch das Rohr TV Wasser in die Kugel, während RS nach oben gerichtet ist, damit die Luft entweichen kann, deren Raum von dem Wasser eingenommen wird. Dann dreht man RS nach unten, wodurch die Öffnungen bei X und L verschlossen werden, und drückt dann den Stempel in das Rohr TV hinab. Dadurch wird Wasser durch das Ventil in die Kugel gedrückt. Wenn man dann Z wieder in die Höhe zieht, kann das Wasser nicht nachfolgen, weil es durch das Ventil zurückgehalten wird. Die Luft in der Kugel nimmt aber nun einen kleineren als den „natürlichen" Raum ein (§ 209) und drückt infolgedessen auf das Wasser. Nachdem man das Eingießen und Einpressen von Wasser mehrmals wiederholt hat, dreht man das Rohr XRL mit RS nach oben. Die Luft drückt dann das Wasser durch das Rohr, so daß es bei S ausstrahlt.

Fig. 221.



Herons Spritzkugel.

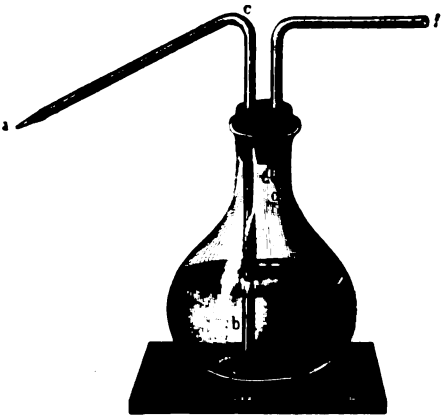
Aus derartigen Beschreibungen kann man den Schluß ziehen, daß es zu Herons Zeit tüchtige Metallarbeiter gegeben haben muß. Anderseits ist es aber auch interessant zu beobachten, welche Vereinfachung dieser Apparat im Laufe der Zeit erfahren hat. Bei der in den chemischen Laboratorien viel gebrauchten Spritzflasche (Fig. 222, a. f. S.) ist die Metallkugel durch eine Glasflasche ersetzt, jede der beiden eingelöteten Metallröhren durch eine Glasröhre, die durch den Stopfen hindurchgeht, der Stempel E durch die menschliche Lunge und das verzweigte Rohr nebst dem Strahlrohr durch eine einfache Biegung und Verengerung des Glasrohrs. Ein Hahn könnte am Strahlrohr angebracht

Digitized by Google

werden, allein es ist überflüssig. Soll das Wasser aufhören auszuströmen, so hört man einfach mit dem Einblasen von Luft auf.

Noch einfacher ist die Spritzflasche oder der sogenannte Heronsball mit nur einem Rohr (Fig. 223), durch welches zuerst Luft eingeblasen wird und dann

Fig. 222.



Spritzflasche mit zwei Röhren.

Fig. 223.

Spritzflasche mit einem Rohr

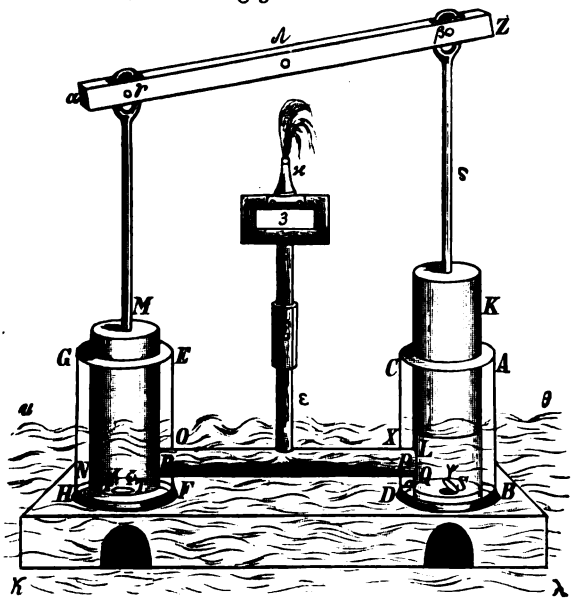
das Wasser durch die zusammengedrückte Luft herausgetrieben wird. Will man das Ausströmen des Wassers unterbrechen, so hält man die Mündung des Glasrohrs mit dem Finger zu.

§ 219. Die Feuerspritze beschreibt Heron ungefähr in folgender Weise. Zwei Cylinder AD und EH (Fig. 224), die innerlich gut poliert und mit den wasserdicht schließenden Kolben K und M versehen sind, sind durch ein Rohr PR verbunden. Die Cylinder sind auf einem Fußgestell angebracht, welches in Wasser steht. Das Wasser kann durch die Ventile in die Cylinder eintreten, aber nicht austreten. Ferner befindet sich an jedem Ende des Rohrs PR ein Ventil, durch welches das Wasser aus dem Cylinder in das Rohr eintreten, aber nicht aus dem Rohr in den Cylinder zurückkehren kann. In der Mitte des Rohrs PR erhebt sich ein Rohr nach oben, welches ebenso wie das Rohr in Fig. 221 mit einer Verzweigung und einem Strahlrohr endigt. Die Kolbenstangen sind oben an einer Querstange befestigt, die wie ein Wagebalken um ihren Mittelpunkt schwingt und durch deren Bewegung die Kolben in den Cylindern abwechselnd aufwärts und abwärts bewegt werden. Wenn ein Kolben in die Höhe geht, tritt das Wasser durch das Bodenventil in den Cylinder. Wenn der Kolben nach unten geht, wird das Wasser durch das Seitenventil in das Rohr PR und das nach oben gehende Rohr mit der Verzweigung und dem Strahlrohr gedrückt. Indem Heron auf Fig. 221 hinweist, ohne die Beschreibung zu wiederholen, will er möglicherweise auch hier eine Hohlkugel (Windkessel) angebracht wissen, um ein gleichmäßiges Ausströmen des Wassers zu bewirken.

Digitized by Google

Wie wenige Veränderungen die Feuerspritze im Laufe der Zeit erlitten hat, ergiebt sich aus der Abbildung einer Spritze, Fig. 225, wie sie heutzu-

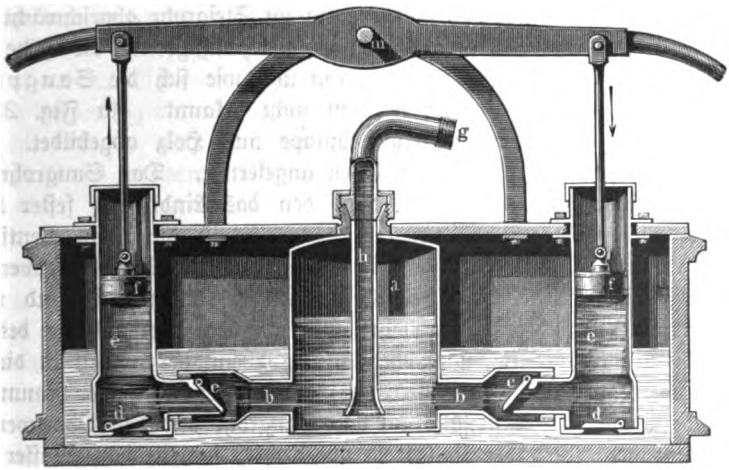
Fig. 224.



Herons Feuerspritze.

tage in Gebrauch sind. Man findet alle wesentlichen Teile wieder, und zwar in unveränderter Anordnung, zwei Cylinder mit Kolben, die durch einen

Fig. 225.



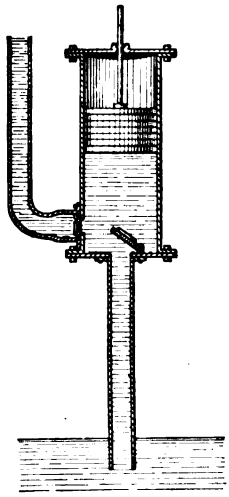
Moderne Feuerspritze.

Digitized by Google

Hebel in Bewegung gesetzt werden, die Bodenventile, sowie das Seitenrohr mit Ventilen. Der Windkessel *a*, aus dem die zusammengedrückte Luft das Wasser durch das Strahlrohr hinaustreibt, findet sich nicht in Herons Zeichnung, kann aber doch an dem Apparat selbst vorhanden gewesen sein. Von dem Strahlrohr bemerkt Heron, daß es so eingerichtet sein müsse, daß man es nach allen Seiten hin richten könne. Daher müsse der hervorragende Teil desselben die Gestalt eines Γ (des griechischen Buchstabens „gamma") haben und um den unteren festen Teil des Rohres drehbar sein. In dieser Hinsicht ist die moderne Feuerspritze noch mehr vervollkommnet, indem der Spritzenschlauch, der bei *g* (Fig. 225) festgeschraubt wird, eine noch größere Freiheit der Bewegung gibt.

§ 220. Mit der Feuerspritze ist die Druckpumpe gegeben. Es ist derselbe Apparat, der nur zu einem anderen Zwecke dient, nämlich nicht um Wasser durch ein kurzes Strahlrohr hindurch, sondern in ein langes „Steigrohr" hinein zu drücken. Man braucht zu diesem Zwecke in der Regel nur einen Cylinder, so daß der Apparat sehr einfach ist, wie aus Fig. 226 ersichtlich ist. Der Cylinder hat ein Bodenventil unten nach dem „Saugrohr" hin, und ein Seitenventil (Druckventil) nach dem „Steigrohr" hin. Wenn der Kolben in die Höhe gezogen wird, muß das Wasser, da in dem Cylinder kein luftleerer Raum entstehen kann, durch das Saugrohr und das Bodenventil in den Cylinder kommen. Wenn der Kolben herabgedrückt wird, wird das letztere Ventil geschlossen und das Wasser durch das Seitenventil in das Steigrohr gedrückt. Das letztere ist oft mit einem Windkessel versehen wie die Feuerspritze, wodurch die Wirkung der Kolbenbewegung im Steigrohr abgeschwächt wird, so daß das Wasser gleichmäßiger in die Höhe steigt.

Fig. 226.



Druckpumpe.

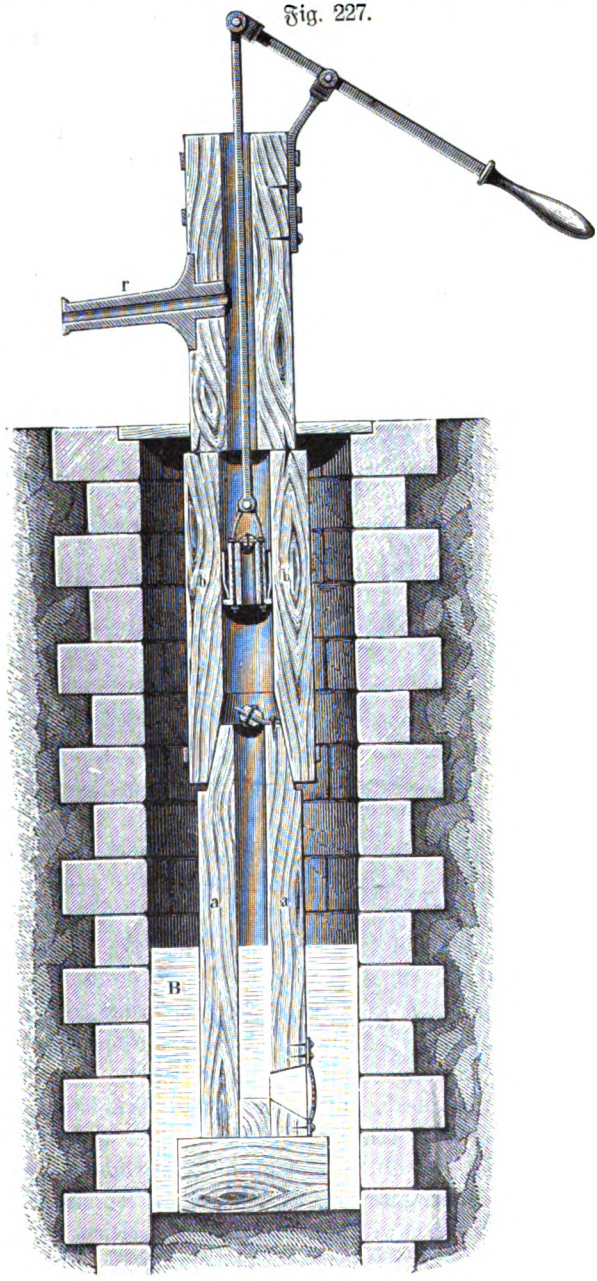
§ 221. Wann und wie sich die Saugpumpe entwickelt hat, ist nicht bekannt. In Fig. 227 ist eine derartige Pumpe aus Holz abgebildet. Heutzutage werden sie übrigens oft aus Eisen angefertigt. Das Saugrohr *a* ist unten durch einen Rost verschlossen, durch den das Eindringen fester Körper verhindert wird. Das obere Ende des Saugrohrs ist durch ein Ventil verschlossen, welches sich nach oben öffnet. Es ist zugleich das Bodenventil in einem sorgfältiger ausgebohrten Stück, in dem der Kolben auf- und niedergeht. Der Kolben selbst ist durchbohrt, und auf dem oberen Ende desselben sitzt ein Ventil, welches sich nach oben öffnet. Wenn der Kolben in die Höhe geht (beim Herabdrücken des Handgriffes) entsteht kein luftleerer Raum unter ihm, sondern das Wasser steigt durch das Saugrohr und das Bodenventil in das Kolbenrohr. Wird der Kolben herabgedrückt, so tritt das Wasser durch den Kolben in den oberen Teil des Cylinders. Mit jeder Kolbenbewegung

Digitized by Google

kommt also mehr Wasser über den Kolben, und wenn es eine hinreichende Höhe erreicht hat, so beginnt es aus einem Seitenrohr auszufließen. So lange noch kein Wasser in der Pumpe gewesen ist, schließen die Ventile und der Kolben gewöhnlich nicht vollkommen, so daß man, um sie in Betrieb zu setzen, etwas Wasser in dieselbe eingießen muß.

§ 222. Zu derselben Zeit, als Stevin und Galilei die Hydrostatik wieder aufnahmen, erschien im Laufe einiger Jahre in Europa eine ganze Anzahl von Übersetzungen der Werke Herons, teils in lateinischer, teils in anderen europäischen Sprachen. Mehrere dieser Übersetzungen sind mit größeren oder kleineren Zusätzen versehen, in denen spätere Erfindungen mitgeteilt werden. Diese verfolgen in der Regel praktische Zwecke, so daß sich diese Heronrenaissance als eine Bewegung darstellt, die bestrebt war, die Naturkräfte in den Dienst der Menschheit zu stellen. Während sich die Wasseruhren bei den Arabern und den Europäern zu wahren Kunstwerken entwickelten, hatte man auch die natürlichen Wasserfälle mehr und mehr in Gebrauch genommen, um größere

Fig. 227.

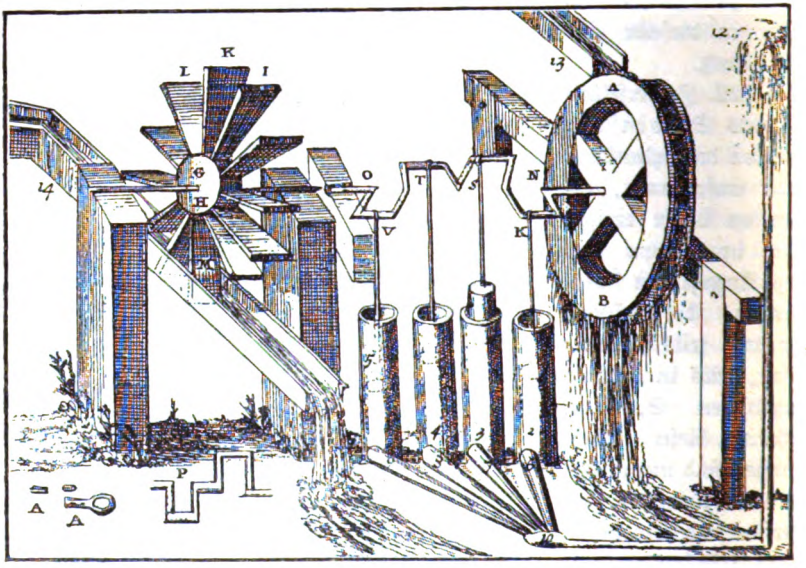


Saugpumpe.

Digitized by Google

Maschinen zu treiben und größere Arbeiten zu verrichten. In den Fig. 228 bis 230, 232 und 233 sind einige Beispiele aus diesen „Zusätzen“ zu den Heron-Übersetzungen abgebildet. Fig. 228 zeigt, wie Wasser mit vier Druckpumpen auf einen „Turm von beliebiger Höhe“ hinaufgedrückt werden kann. Die Kolben werden von vier Krummzapfen geführt, von denen sich links unten in der Figur eine besondere Abbildung findet. Die Achse, auf der die Krummzapfen sitzen, wird zugleich von einem unterschlächtigen und

Fig. 228.



Pumpen, von Wasserrädern getrieben.

einem oberschlächtigen Wasserrad getrieben. Es sollen offenbar durch eine und dieselbe Figur beide Arten der Wasserräder veranschaulicht werden.

In den „Zusätzen“ sind zahlreiche Kraftmaschinen (Motoren), d. h. Maschinen beschrieben, die Bewegungskraft abgeben, ebenso zahlreiche Arbeitsmaschinen, d. h. Maschinen, durch welche die Bewegung ausgenutzt wird.

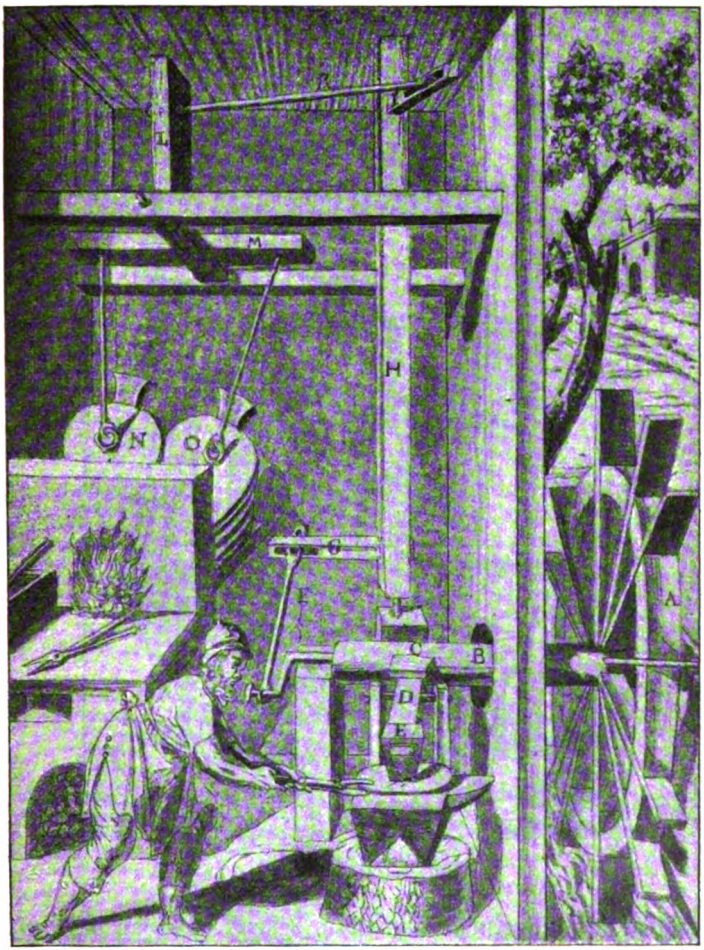
Fig. 229 zeigt ein Wasserrad, welches vermittelst des auf der Welle angebrachten Zapfens *C* bei jeder Umdrehung den Hammer *E* durch den Druck auf den Schaft *D* hebt, so daß der Hammer, wenn er von dem Zapfen losgelassen wird, mit seinem ganzen Gewicht auf das Eisen fällt, welches der Schmied auf den Amboß legt. Das unterschlächtige Wasserrad ist wahrscheinlich das älteste von allen Wasserrädern. Es soll am Tiber bei Rom im 6. Jahrhundert n. Chr. gebraucht worden sein. Die Schaufeln, welche in den Strom hineinragen, werden von diesem fortgetrieben.

§ 223. Auch andere als die durch Wasser getriebenen Kraftmaschinen werden beschrieben. So finden sich in den „Zusätzen“ Tretmühlen, die von

Digitized by Google

Menſchen oder von Tieren in Bewegung geſetzt werden. Fig. 230 (a. f. S.) zeigt eine Tretmühle, die von einem Menſchen in Bewegung geſetzt und durch die ein Mahlgang getrieben wird. Auch eine Tretmühle mit einem Pferd auf dem Tretrade, ebenſo ein Pferdegöpel findet ſich abgebildet. Der letztere iſt jedoch

Fig. 229.



Hammermühle.

nichts neues, wie man aus Fig. 231 (a. S. 237) erſieht, welche das Mahlen des Getreides im alten Rom vorſtellt.

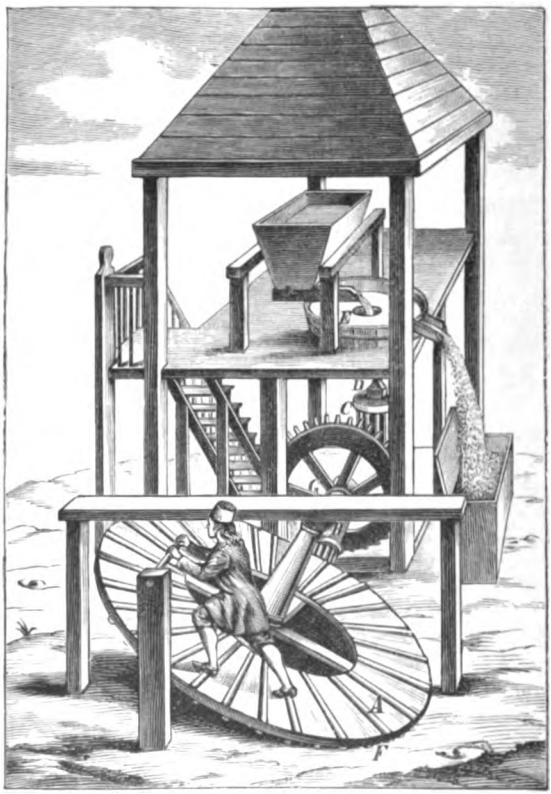
§ 224. Die „Zuſätze“ lehren ferner, daß auch die Kraft des Windes in Gegenden zur Anwendung kam, wo es keine natürlichen Waſſerläufe mit Gefälle gab. Das letztere kann man auch von den Gegenden in Aſien (Per-

Digitized by Google

sien) sagen, wo die Windmühle wahrscheinlich ihren Ursprung hat. Von hier kam sie zu den Arabern.

Washington Irving schreibt hierüber in der Geschichte der Kalifen: „Unter den Persern, die als Sklaven nach Medina gebracht wurden, befand sich ein Mann namens Firus, der der Sekte der Magier oder Feueranbeter angehörte. Als er von seinem Herrn den Befehl erhielt, von seinem Ver-

Fig. 230.



Tretmühle.

dienste täglich zwei Silberstücke abzugeben, beschwerte er sich bei Omar über diese Erpressung. Der Kalif befragte ihn über seine Verhältnisse und als er vernommen hatte, daß er Zimmermann und geschickt im Erbauen von Windmühlen sei, antwortete er, daß ein Mann, der sich in einem solchen Handwerk auszeichne, ganz gut zwei Silberstücke bezahlen könne. Über dieses Urteil erbittert, ermordete Firus den Kalifen zwei Tage später in der Moschee. Dies geschah im Jahr 23 der Hedschra oder 644 n. Chr.“

Während der Kreuzzüge lernten die Europäer die Windmühle kennen, und man weiß bestimmt, daß sie 1105 in Frankreich und 1143 in England

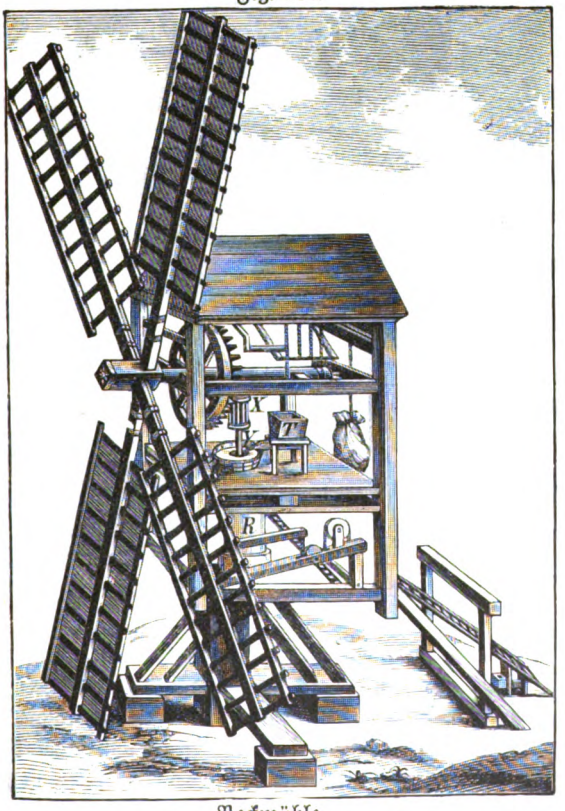
Digitized by Google

bekannt war. Doch hat sie wahrscheinlich mehrere Jahre lang zu den größten Seltenheiten gehört, denn man weiß, daß ein gewisser Bartolomeo

Fig. 231.

Getreidemühle im alten Rom.

Fig. 232.

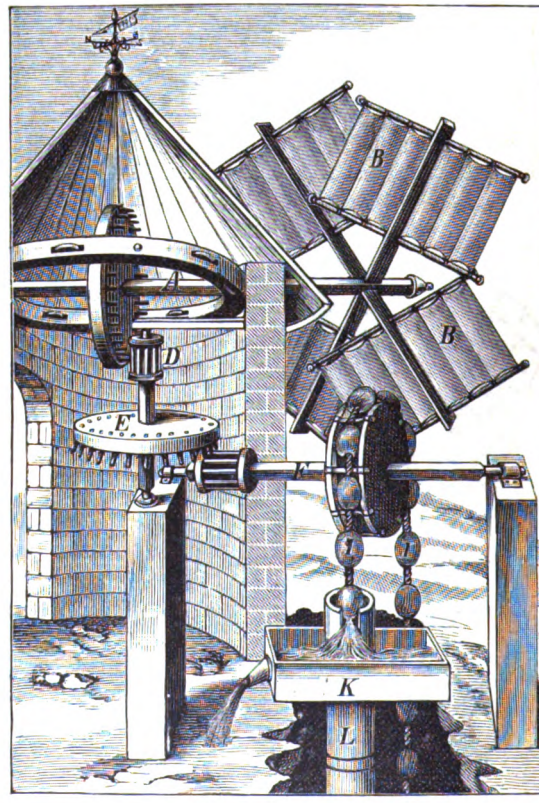


Bockmühle.

Digitized by Google

Verde 1332 den Venetianern empfahl, eine Windmühle anzuschaffen, und daß 1393 eine solche in Speyer erbaut wurde. Aber mit dem erneuten Studium Herons kam auch in diese Sache Bewegung. Anfangs mußte man die ganze Mühle gegen den Wind drehen. Die sogenannten Bockmühlen, Fig. 232 (a. v. S.), drehten sich um einen vertikalen Ständer. Die „holländische" Windmühle soll um 1650 in Flandern erfunden worden sein. Bei diesen wird nur das Dach (die Haube) mit den Flügeln gegen den Wind gedreht, während die eigentliche Mühle feststeht. Die in Fig. 233 abgebildete Mühle

Fig. 233.



Die holländische Windmühle.

treibt eine Art Pumpe, das sog. Paternosterwerk. Ein in sich selbst zurücklaufendes Seil (Seil ohne Ende) ist gleichmäßig mit Kugeln besetzt. Das Seil läuft über zwei Scheiben, von denen in der Figur die obere sichtbar ist. Die untere, die in der Figur nicht sichtbar ist, befindet sich im Wasser. Die obere wird von der Mühle gedreht, und der aufwärts gehende Teil des Seils bewegt sich in einem glatten Rohr. Der Durchmesser dieses Rohrs ist

Digitized by Google

nicht viel größer als der Durchmesser der Kugeln, und wenn sich das Seil einigermaßen schnell bewegt, so wird das Wasser zwischen den Kugeln zum größten Teil mit in die Höhe gezogen.

Diese und viele andere Zusätze zu Heron bezeichnen offenbar eine Entwickelung von Maschinen- oder Motorenbetrieb im großen. An dieser Entwickelung war namentlich Salomon de Caus beteiligt, von dem später noch die Rede sein wird. Er suchte nämlich auch die Angaben Herons über die Wirkung der Wärme auf Dämpfe praktisch zu verwerten. Wir treffen ihn daher in der Reihe der Männer, die sich mit der Anwendung der Dampfkraft beschäftigt haben. Es dauerte jedoch viele Jahre, bis die Dampfmaschine mit den genannten Motoren auf gleiche Höhe kam und sie schließlich überflügelte.

§ 225. Selbstverständlich hatten lange vor der Renaissancezeit Handwerke existiert. Daß das Altertum ausgezeichnete Handwerker besaß, zeigen die erhaltenen Überbleibsel ihrer Tätigkeit in Ägypten, in Pompeji und an anderen Orten. Ebenso hatten einige Kraftmaschinen schon lange existiert, z. B. der Pferdegöpel, das Wasserrad und die Windmühle. Aber es ist auffallend, wie eifrig man im 16. und 17. Jahrhundert damit beschäftigt war, Beschreibungen dieser praktischen Vorrichtungen (Kraftmaschinen und Arbeitsmaschinen) als Zusätze zu dem Werke des Mathematikers und Physikers Heron zu beschreiben, obwohl viele derselben in gar keinem Zusammenhang mit diesem Werke stehen. Es ist, als ob man das Bedürfnis empfunden habe, diese ganze in der Entwickelung begriffene Technik mit der Wissenschaft in Beziehung zu bringen und gleichzeitig dieser als der Führerin seine Huldigung zu bezeugen. Seit dieser Zeit haben Theorie und Praxis stets in fruchtbringender Wechselwirkung zu einander gestanden. Die Wissenschaft hat sich die Erfahrungen der Industrie- und Ingenieurtätigkeit zu Nutze gemacht, und oft sind die Fortschritte der Wissenschaft sehr bald praktisch verwertet worden, nachdem die Männer der Praxis erkannt hatten, daß die Eroberungen der Wissenschaft oft eine große Tragweite besitzen, selbst wenn sie anscheinend sehr geringfügiger Natur sind. Diese Wechselwirkung hat zu bedeutenden Resultaten geführt. Die 200 bis 300 Jahre, welche seit jener Zeit verflossen sind, sind ein verhältnismäßig kurzer Zeitraum, wenn man die in dieser Zeit gemachten Fortschritte in der Erkenntnis und der Beherrschung der Natur mit den Leistungen früherer Jahrtausende vergleicht.

§ 226. Bei der immer ausgedehnteren Anwendung der Wasserkraft bot sich natürlich die Frage nach der Größe der Nutzwirkung, was notwendigerweise zu einer klaren Auffassung des Begriffes der Arbeit führte. Jedes Pfund Wasser, welches einen Fuß fallen kann, hat ein Arbeitsvermögen, welches ein Fußpfund genannt wird. Wenn man nach Gramm und Meter rechnet, so ist das Meterkilogramm die Arbeitseinheit.

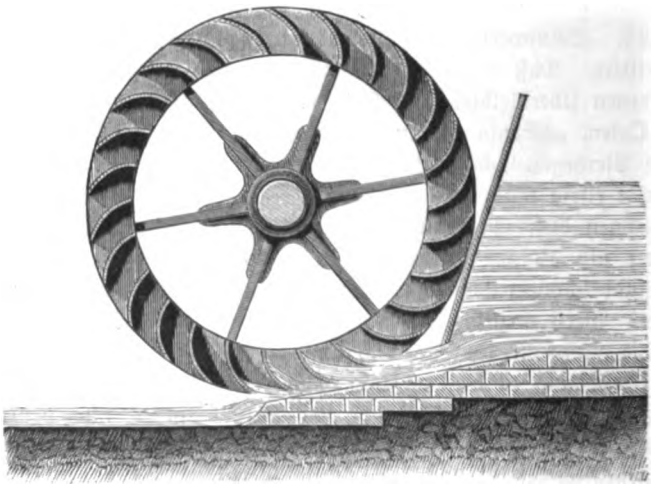
Wenn z. B. ein Wasserlauf in der Sekunde 1200 Liter Wasser liefert, die aus einer Höhe von 2 m auf ein Wasserrad fallen, so hat das Wasser ein Arbeitsvermögen von 2400 Meterkilogramm in der Sekunde. Keine Wasser-

Digitized by Google

mühle kann jedoch die volle Nutzwirkung geben. Die wirkliche Nutzwirkung pflegt man in Prozenten des durch die Wassermasse und die Fallhöhe bestimmten Arbeitsvermögens anzugeben.

Um die Nutzwirkung so groß als möglich zu machen, wird die Wasserrinne, welche den arbeitenden Schaufeln das Wasser zuführt, so geformt, daß sie sich möglichst dicht an das Rad anschließt. Es ist jedoch nicht zu vermeiden, daß viel Arbeitsvermögen verloren geht, teils durch den Stoß gegen die Schaufeln, teils, weil sich das Rad nicht ganz dicht an den Boden und die Seiten der Rinne anschließen kann, namentlich aber, weil das Wasser, welches gearbeitet hat, mit einer bedeutenden Geschwindigkeit abfließt, also

Fig. 234.



Ponceletrad.

noch viel Energie besitzt (§ 182), die für die Mühle verloren ist. Das beste unterschlächtige Rad, das Ponceletrad, Fig. 234 (von dem französischen Mathematiker Poncelet, 1788 bis 1867, konstruiert), liefert etwa 55 Proz. Nutzwirkung.

Günstiger liegen die Verhältnisse beim oberschlächtigen Rade. Dieses kann so eingerichtet werden, daß sein Umfang aus einer großen Anzahl von Wasserkammern besteht. Das Wasser läuft aus der Rinne in diese Kammern und drückt die eine Seite des Rades durch sein Gewicht nach unten. Aber auch hier geht ein Teil des Arbeitsvermögens des Wassers verloren, so daß man im günstigsten Fall 83 Proz. Nutzwirkung hat (Fig. 235).

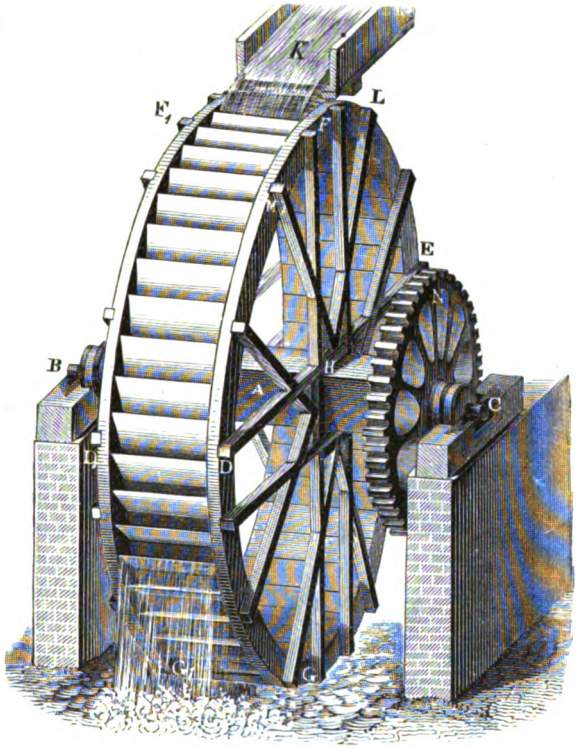
§ 227. Bei der Anwendung der Kraft des Windes handelt es sich darum, einen Teil der Energie, welche die Luftteilchen vermöge ihrer Geschwindigkeit besitzen, auf die Flügel der Mühle und von diesen auf die Achse u. s. w. zu übertragen.

Lange bevor man die Windmühle kannte, hatte man bei den Segel-

Digitized by Google

schiffen den Wind als bewegende Kraft benutzt. Um die Wirkung zu verstehen, benutzt man den Satz vom Parallelogramm der Kräfte (§ 176). Es sei *ab* (Fig. 236, a. f. S.) das Segel und *og* stelle den Druck des Windes auf das Segel nach Richtung und Größe vor. Dieser Druck wird in die Komponenten *oc* und *od* zerlegt. Nur die letztere übt auf das Segel und folglich auf das Schiff, auf dem das Segel befestigt ist, einen Druck aus. Die Kraft *od* wird nochmals in zwei Komponenten zerlegt, von denen die eine, *oc*, in die Längsrichtung des Schiffes fällt, die andere, *of*, senkrecht auf dieser Richtung steht. Die erste treibt das Schiff vorwärts, die zweite treibt es nach der Seite, aber nicht viel, da das Schiff nach seiner ganzen Bauart sich nicht leicht seitwärts durch das Wasser bewegt. Wie aus Fig. 236 zu ersehen ist, kann das Schiff in schiefer Richtung gegen den Wind segeln.

Fig. 235.



Oberschlächtiges Wasserrad.

In ähnlicher Weise erklärt man die Wirkung des Windes auf die Windmühlenflügel. Wenn *og* in Fig. 237 (a. f. S.) die Richtung und die Größe der Kraft des Windes, zugleich auch die Richtung der Achse der Windmühlenflügel vorstellt, so zerlegt man *og* in *oc* (unwirksam) und *od* und die letztere Komponente wieder in *of* und *oe*. Die letztere Komponente setzt den Flügel in Bewegung.

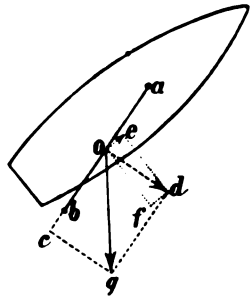
Die Verhältnisse liegen jedoch nicht so einfach, weder beim Segelschiff, noch bei der Windmühle. Die Wirkung der bewegten Luft — durch Druck auf der einen und Saugen auf der anderen Seite — ist eine sehr verwickelte. Die im Vorhergehenden gegebene Erklärung kann zu einem vorläufigen Verständnis der Erscheinungen dienen, aber die Verhältnisse müssen doch in einer viel gründlicheren Weise behandelt werden, oder man muß sich mit empirischen Messungen der Wirkungen begnügen. Der Druck auf die Fläche *ab* (Fig. 237) ist nämlich keineswegs gleich *od*, und die Luftströmung übt außer-

Digitized by Google

dem auf die Rückseite von ab, wo der Wind eine Verdünnung der Luft erzeugt, eine saugende Wirkung aus, die den Flügel nach vorn zieht.

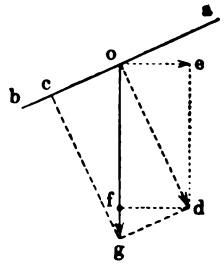
In Fig. 238 ist eine Windmühle neuerer Bauart abgebildet. Das kleine Windrad über der Haube hat die Aufgabe, die Haube so zu drehen, daß die

Fig. 236.



Wirkung des Windes auf ein Segel.

Fig. 237.



Wirkung des Windes auf einen Windmühlenflügel.

Flügel sich stets gegen den Wind wenden. Es bewegt sich nämlich in der einen oder der anderen Richtung, je nachdem es auf der einen oder auf der anderen Seite vom Wind getroffen wird. Seine Achse steht durch Zahnräder in Verbindung mit einem Mechanismus, der je nach der Richtung des Windes die Haube nach der einen oder nach der anderen Seite dreht. Die Flügelflächen bestehen aus Jalousien. Jede derselben kann durch einen Hebel geschlossen und geöffnet werden. Die sämtlichen kleinen Hebel sind mit einem größeren verbunden, der wieder mit dem „Ladestock" in Verbindung steht. Dieser geht durch die ausgebohrte Welle des Rades. Ein am Ladestock wirkendes Gewicht strebt die Jalousien geschlossen zu halten, während der Wind sie zu öffnen strebt. Wenn also der Wind stark ist, so wird er die Jalousien mehr oder weniger öffnen. Es wird auf diese Weise vermieden, daß der Wind eine zu starke Wirkung auf die Mühle ausübt.

Fig. 238.

Windmühle.

Digitized by Google

Das Luftmeer.

§ 228. Wenn Heron sagt (§ 209), daß die Luft ein Körper ist, der z. B. das Wasser hindert, in ein Gefäß einzudringen, wenn er nicht selbst entweichen kann, so ist dies nicht etwas ganz Neues, und er gibt es auch nicht als etwas Neues aus, sondern er sagt, daß er unter den verschiedenen Ansichten, welche man aufgestellt habe, diese billige. Man dachte damals im allgemeinen ebensowenig wie heute daran, daß der pfeifende Ton, den ein schnell durch die Luft bewegter Stock erzeugt, beweist, daß die Luft ein Körper ist, und daß die von Heron hervorgehobenen Erscheinungen dasselbe beweisen. Man bewegt sich durch die Luft, man streckt die Hand durch die Luft aus und bewegt Gegenstände durch dieselbe, ohne im geringsten an das Vorhandensein der Luft zu denken. Nur bei außergewöhnlichen Gelegenheiten, wenn uns z. B. der Sturm umzuwerfen droht oder wenn die in einer Knallbüchse zusammengedrückte Luft den Stöpsel mit einem Knall herausschleudert, widmet man der Luft wohl vorübergehend einige Aufmerksamkeit.

Mehrere griechische Philosophen haben dagegen über die Sache nachgedacht, und Aristoteles glaubte sogar das Gewicht der Luft durch den Versuch nachgewiesen zu haben. Er wog nämlich eine Blase, erst leer und dann aufgeblasen, also mit Luft gefüllt, und fand, daß sie im letzteren Zustand mehr wog als im ersteren. Dies beruht aber möglicherweise auf einem Fehler in der Wägung, denn eine leere und eine aufgeblasene Blase werden im allgemeinen auf einer Wage dasselbe Gewicht zeigen. Allerdings besitzt die Luft Gewicht, so daß eine mit Luft gefüllte Blase schwerer ist als eine leere, allein man muß bedenken, daß die Wägung in der Luft vorgenommen wird, und hier findet dasselbe statt wie beim Wägen im Wasser. Der Körper verliert an Gewicht so viel, wie die verdrängte Luft wiegt. Da aber die in der aufgeblasenen Blase enthaltene Luft fast genau ebensoviel wiegt wie die von der Blase verdrängte Luft, so macht es kaum einen Unterschied, ob die Blase leer oder mit Luft gefüllt ist. Es ist aber auch möglich, daß bei dem von Aristoteles ausgeführten Versuch die Luft in der Blase etwas zusammengedrückt gewesen ist und folglich ein etwas größeres Gewicht gehabt hat als die von der gefüllten Blase verdrängte Luft.

Jedenfalls gab Heron gute Gründe dafür an, daß die Luft ein Körper ist, und der von Aristoteles ausgeführte Versuch schien dies zu bestätigen.

§ 229. Galilei war der erste, der wirklich durch eine Wägung den Beweis lieferte, daß die Luft Gewicht hat. Er bediente sich zur Ausführung dieser Wägung nicht einer Blase, sondern einer Flasche, also eines Gefäßes, welches immer dasselbe Volumen besitzt, einerlei ob es mit Luft gefüllt ist oder nicht. Daher ist der Auftrieb in beiden Fällen derselbe, während das Gewicht des Inhaltes verschieden ist.

Galilei drückte nämlich Luft in der Flasche zusammen und fand, daß sie hierdurch schwerer wurde. Indem er dieselbe Flasche mit Wasser gefüllt

Digitized by Google

wog, fand er, daß das Wasser 400 mal so viel als die Luft wiegt. Die Zahl mag an und für sich richtig sein, aber sie hat keinen Wert, da man in einer Flasche sehr verschiedene Mengen Luft zusammendrücken kann. Galilei schlägt noch eine andere Methode vor, nämlich die Flasche zuerst mit gewöhnlicher (nicht zusammengedrückter) Luft zu wiegen und dann die Luft durch Erwärmen aus der Flasche auszutreiben. Diese Methode, die „gewöhnliche" Luft zu wiegen, würde gut sein, wenn man die Luft wirklich durch Wärme vollständig austreiben könnte. Dies ist aber nicht möglich, und zu Galileis Zeit kannte man kein anderes Mittel, die Luft auszutreiben.

§ 230. Hier muß eine andere Untersuchung Galileis erwähnt werden, die zwar etwas ganz anderes betrifft, die aber doch mit jenen Wägungen in einem gewissen Zusammenhang steht, wenn auch Galilei das Vorhandensein eines solchen Zusammenhangs nicht bemerkte.

Galilei studierte u. a. die Festigkeit der Körper und untersuchte, welche Kraft erforderlich ist, um einen Körper zu zerreißen oder zu zerbrechen. Es gelang ihm zwar nicht, diese Verhältnisse in einer ebenso vollkommenen Weise aufzuklären wie die Bewegungslehre, aber er machte doch verschiedene richtige Beobachtungen, so z. B. daß ein röhrenförmiger Balken eine größere Tragfähigkeit besitzt als ein massiver Balken von demselben Gewicht und derselben Länge. Er weist darauf hin, wie zweckmäßig es ist, daß die Knochen, die Federn der Vögel und viele Pflanzenstengel hohl sind. Er sagt ferner, daß von zwei Balken aus demselben Stoff, die denselben Querschnitt, aber verschiedene Länge haben, nicht der eine sein Gewicht ebenso leicht trägt wie der andere, ja daß man sich den einen so groß denken kann, daß er sich nicht selbst tragen kann, sondern daß er unter seinem eigenen Gewicht zerbricht. Daher existiert für die Größe der Tiere eine Grenze, wenn sie nicht unter ihrem eigenen Gewicht zusammenbrechen sollen, und die größten Tiere findet man im Meer, welches das Gewicht derselben durch den Auftrieb vermindert. Ebenso, fügt er hinzu, kann ein Metalldraht, der an dem einen Ende aufgehängt ist, so lang und also so schwer sein, daß er sich selbst zerreißt.

§ 231. Diese Erscheinungen standen nach der Ansicht Galileis in Zusammenhang mit einer Beobachtung, die man in Florenz über die Wirkung der Saugpumpen gemacht hatte. Man wollte vermittelst solcher Pumpen Wasser auf eine beträchtliche Höhe heben, aber die Pumpen wirkten nicht. Galilei, der zu Rate gezogen wurde, untersuchte die Pumpen und fand, daß sie in Ordnung waren, daß sie aber das Wasser nicht höher als auf 18 italienische Ellen (ungefähr 10 m) hoben. Aristoteles und nach ihm Heron waren der Ansicht gewesen, daß ein leerer Raum nicht existieren könne, und Aristoteles hatte ausgesprochen, daß die Natur einen Abscheu vor dem Leeren habe. Zur Zeit Galileis war die Redensart „Abscheu vor dem leeren Raum" (*horror vacui*), sowie mehrere andere aristotelische Ausdrücke, die an menschliche Empfindungen und Absichten erinnern, allgemein in Gebrauch, und den

Digitized by Google

Physikern des 16. und 17. Jahrhunderts wurde es nicht leicht, sich von ihnen frei zu machen.

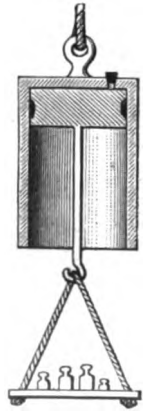
Über diesen Punkt hatte sich Heron etwas objektiver ausgedrückt, indem er einfach sagte, es könne kein wirklich leerer Raum existieren, weil stets die Teile der umgebenden Körper in den leeren Raum eindringen.

Galilei setzte an die Stelle des „Abscheus" vor dem leeren Raum den mehr physikalischen Ausdruck „Widerstand" gegen den leeren Raum. Er denkt dabei an etwas Ähnliches wie den Widerstand des erwähnten Metalldrahtes gegen das Zerreißen. Dieser Widerstand kann überwunden werden, und Galilei erblickt in der Wassersäule, die sich von dem Pumpenkolben abreißt, eine ähnliche Erscheinung. Die Wassersäule wird so schwer, daß sie durch ihr eigenes Gewicht abgerissen wird. Dies muß allerdings nur von der Länge und nicht von der Breite abhängen, ebenso wie ein Kupferdraht von einer gewissen Länge zerreißt, einerlei wie dick er ist.

Nun hätte man erwarten sollen, daß die abgerissene Wassersäule vollständig herabfallen würde. Dies würde der Kupferdraht jedenfalls getan haben. Da dies aber nicht der Fall war, dachte Galilei, daß dieser „Widerstand gegen das Leere" eine bestimmte Größe habe, und da die hängende Wassersäule als ein Maß für die Größe des Widerstandes betrachtet werden konnte, suchte er dieselbe durch eine rein mechanische Vorrichtung zu messen.

Ein Zylinder wird mit dem Boden nach oben aufgehängt (Fig. 239). Im Zylinder wird ein luftdicht schließender Kolben angebracht, dessen Stange mit einem Haken endet, an dem eine mit Gewichten belastete Schale hängt. Galilei war bereits hochbetagt, als er anfing, sich mit diesen Dingen zu beschäftigen, und es war erst Torricelli, dem es gelang, dieselben vollständig aufzuklären.

Fig. 239.



Galileis Messung des Widerstandes gegen den leeren Raum.

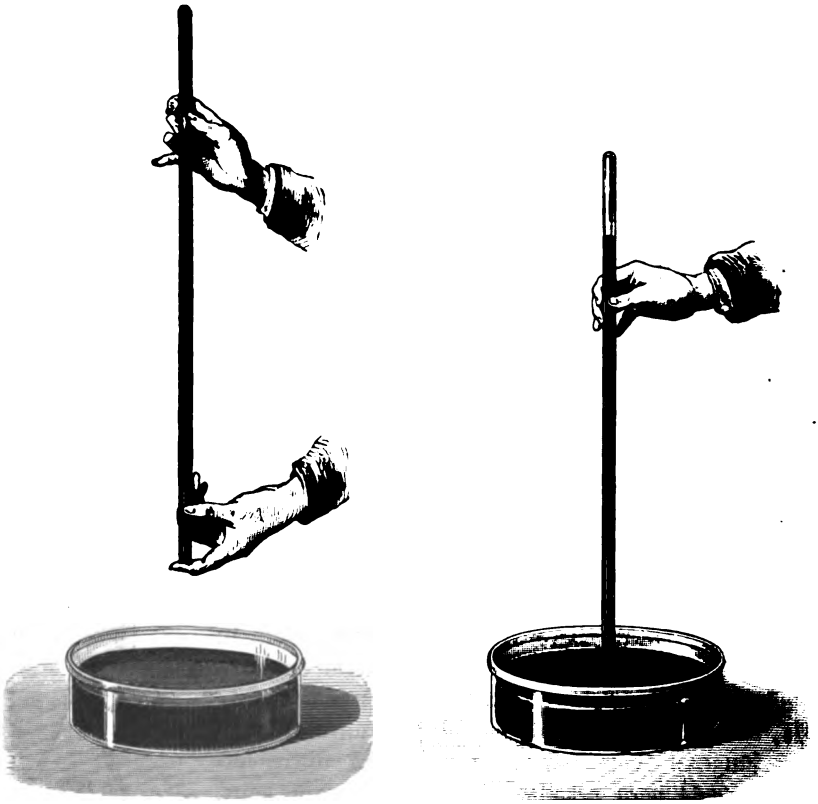
§ 232. Evangelista Torricelli war 1608 in Faenza geboren. Er widmete sich in Rom dem Studium der Mathematik. Sein Lehrer war Benedetto Castelli, ein Benediktinermönch von Monte Cassino, der in seinen jüngeren Jahren Galilei bei seinen astronomischen Beobachtungen geholfen und z. B. gefunden hatte, daß man das Bild der Sonne und der Sonnenflecke beobachten kann, indem man das Objektiv des Fernrohrs ein Bild der Sonne auf eine weiße Fläche werfen läßt (vergl. § 102). Castelli hatte sich später durch vorzügliche Schriften über die Bewegung des Wassers ausgezeichnet und war unter Papst Urban VIII. der Leiter großer Wasserwerke in Rom geworden. Im Jahr 1641 besuchte er auf einer Reise nach Venedig Galilei in Arcetri bei Florenz und erzählte diesem u. a. vom jungen Torricelli, der sich mit Galileis Bewegungslehre beschäftigt und diese weiter bearbeitet hatte. Dies hatte zur Folge, daß Torricelli nach Arcetri kam,

Digitized by Google

hier einige Monate mit Galilei bis zu dessen Tod zusammenlebte und während dieser Zeit dessen Mitteilungen über verschiedene Arbeiten aufzeichnete (§ 145).

§ 233. Torricelli wollte nach dem Tode Galileis nach Rom zurückkehren, allein der Großherzog übertrug ihm die bis dahin von Galilei bekleidete Stelle, was für ihn die Veranlassung bildete, verschiedene von Galilei in Angriff genommene Fragen weiter zu verfolgen. Unter anderem nahm

Fig. 240.



Der Torricellische Versuch.

er die Frage nach dem Steigen des Wassers im leeren Rohr wieder auf. Er erkannte, daß es zur Aufklärung der Sache zweckmäßig sein würde, die lange undurchsichtige Pumpe durch ein Glasrohr und das Wasser durch Quecksilber zu ersetzen. Diesen Gedanken teilte er seinem Freunde Viviani mit, der dann den folgenden Versuch ausführte. Er nahm ein Glasrohr von ungefähr 1 m Länge, welches am einen Ende geschlossen war, füllte es vollständig mit Quecksilber, hielt es mit dem Finger zu, kehrte es um und tauchte es mit der Mündung in ein Gefäß mit Quecksilber. Als er nun den Finger ent-

Digitized by Google

fernte, sank das Quecksilber, aber nur so viel, daß eine Quecksilbersäule übrig blieb, deren Höhe ungefähr $^1/_{14}$ von der Höhe der Wassersäule in den Pumpen war. Quecksilber ist aber 14mal so schwer als Wasser. Hiermit war die Vermutung Torricellis, daß das Gewicht der Flüssigkeitssäule in beiden Fällen dasselbe sein würde, bestätigt. Die Erscheinung konnte also nicht wohl eine ähnliche sein, wie das Zerreißen eines Metalldrahtes unter dem Einfluß seines Gewichtes, da hier nicht nur das Gewicht, sondern auch die Stärke des Metalls eine Rolle spielen muß. Allein die Annahme Galileis, daß die Natur dem Entstehen eines leeren Raumes einen gewissen Widerstand entgegensetzt, war durch den Torricellischen Versuch noch nicht widerlegt. Man hatte diesen Widerstand nur in einer neuen Art gemessen, nämlich durch das Gewicht einer Quecksilbersäule.

§ 234. Jetzt kam aber Torricelli auf den genialen Gedanken, der für die Gelehrten der damaligen Zeit durchaus kein naheliegender war, daß nämlich der Grund für das Steigen des Wassers oder Quecksilbers nicht ein innerer Widerstand gegen das Entstehen eines leeren Raumes ist, sondern ein äußerer Druck, der auf dem Wasser im Brunnen und ebenso auf dem Quecksilber in dem Gefäß ruht, ein Druck, der in beiden Fällen gleich groß sein muß, da er die beiden Flüssigkeiten im umgekehrten Verhältnis ihrer spezifischen Gewichte in die Höhe treibt (§ 205). Dieser Druck, so schließt Torricelli weiter, kann derjenige Druck sein, den die Luft durch ihr Gewicht ausübt. Daß die Luft etwas wiegt, war ja durch Galilei nachgewiesen. Und da die Menge der Luft eine sehr bedeutende ist — Torricelli dachte sich die Atmosphäre 50 Meilen hoch — so ist es durchaus nicht undenkbar, daß die Luft denselben Druck ausübt wie ein Wassermeer von 18 italienischen Ellen (10 m) Tiefe oder ein Quecksilbermeer von 760 mm Tiefe.

Bei wiederholter Beobachtung der Höhe der Quecksilbersäule bemerkte Torricelli alsbald, daß sie veränderlich ist, und er erkannte sofort, daß die Ursache darin liegt, daß das Luftmeer an einem und demselben Ort nicht immer dasselbe Gewicht hat, sondern daß der Druck auf die Erdoberfläche vom augenblicklichen Zustande der Atmosphäre, namentlich der Wärme an dem betreffenden Orte abhängt. Er fand ferner, daß man diesen Apparat benutzen kann, den Zustand der Luft zu beobachten und Angaben über das Wetter zu machen. Er ist der Erfinder des Barometers, eines Instrumentes, vermittelst dessen man mißt, wie schwer (griech. βαρός) die Luft ist.

An die Stelle der alten Auffassung, daß die Welt überall mit Luft angefüllt ist, wo keine handgreiflichen Gegenstände sind, trat nun die neue, daß die Luft wie ein Meer um die Erde herumliegt, welches zwar so tief oder so hoch ist, daß es die höchsten Bergspitzen bedeckt, aber doch eine verhältnismäßig geringe Tiefe hat im Vergleich mit der Größe der Erdkugel. Hiermit war auch die Schwierigkeit gehoben, die Regiomontanus und anderen (§ 61) die Vorstellung gemacht hatte, daß sich die Erde im Raum bewegt, indem sie glaubten, sie müsse durch die Luft hindurchdringen. Nun erkannte man, daß

Digitized by Google

das Luftmeer der Erdkugel sich zugleich mit dieser durch den Raum bewegt. Die Tragweite dieser Entdeckung war eine sehr bedeutende.

§ 235. Das Barometer nahm alsbald die in Fig. 241 abgebildete Form an, die es neben anderen neueren Formen (siehe Meteorologie) bis auf den heutigen Tag beibehalten hat. Der längere Schenkel des Rohres ist oben zugeschmolzen. Das Gefäß am Ende des kürzeren Schenkels ist offen, so daß die Luft auf das Quecksilber drücken kann. Die Quecksilbersäule im geschlossenen Schenkel (vom Niveau des Quecksilbers im offenen Schenkel aus gemessen) gibt die Größe des Luftdruckes an. Außer den bekannten Wetterangaben „schön, veränderlich, Sturm" u. s. w. findet man am Barometer gewöhnlich eine abgekürzte Skala, an der man die Höhe der Quecksilbersäule ablesen kann. Der mittlere Barometerstand am Meeresufer ist gleich 28 Pariser Zoll oder 760 mm.

Fig. 241.

Barometer.

§ 236. Torricelli erwies sich auch in anderer Hinsicht als ein würdiger Schüler Galileis. Er führte wertvolle Untersuchungen über das Fernrohr und das Mikroskop aus, empfahl kleine Glaskugeln als verhältnismäßig gute Mikroskope und behandelte und erweiterte die Gleichgewichtslehre und die Bewegungslehre. Er fand z. B., daß, wenn sich Körper gegenseitig das Gleichgewicht halten, eine kleine Bewegung niemals ein Steigen oder Sinken des gemeinsamen Schwerpunktes zur Folge hat (Unmöglichkeit eines durch Gewichte bewegten Perpetuum mobile). Er fand ferner, daß, wenn ein Körper mit einer gewissen Geschwindigkeit, aber in verschiedener Richtung geworfen wird, alle so entstehenden paraboliſchen Bahnen von einer Parabel eingehüllt werden (Fig. 242).

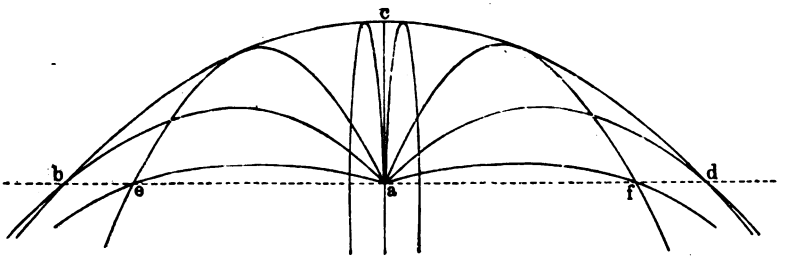
§ 237. Ferner studierte Torricelli das Ausströmen des Wassers aus einem Gefäß, ein Studium, welches wegen seiner Bedeutung für die Wasseruhren damals von besonderem Interesse war. Hier fand er unter anderem das folgende wichtige Gesetz: Wenn eine Flüssigkeit aus einer Öffnung in einem Gefäß ausläuft, so ist die Geschwindigkeit in der Öffnung gerade so groß, als wenn die Flüssigkeit eine Höhe durchfallen hätte, die gleich dem Abstand der Öffnung von der Oberfläche der Flüssigkeit ist, einerlei in welcher Richtung das Ausströmen erfolgt[1]). Dies steht im Einklang mit dem später gefundenen Satz, daß keine Energie verloren geht (§ 182). Sollte nämlich das ausgelaufene Wasser in das Gefäß zurückgebracht werden, so müßte es bis auf die Oberfläche des

[1]) Ist der Abstand der Öffnung von der Oberfläche d, so ist die Ausflußgeschwindigkeit $v = \sqrt{2gd}$ (§ 149).

Digitized by Google

Wassers gehoben werden. Dies ist aber nur dadurch möglich, daß das Wasser mit derselben Geschwindigkeit in die Höhe steigt, die es erlangen würde, wenn es von derselben Höhe herabfiele. Der Strahl eines Springbrunnens kann daher, wie Torricelli richtig bemerkt, höchstens bis auf das Niveau des Wassers steigen, welches den Springbrunnen speist. Wegen der immer vorhandenen Widerstände wird diese Höhe tatsächlich niemals erreicht.

Fig. 242.



Einhüllende Parabel der Wurfparabeln.

Torricelli fand auch, daß sich ausströmendes Wasser gerade so wie andere geworfene Körper in paraboliſchen Bahnen bewegt, und er benutzte gerade die Bahn, welche ein Strahl beschreibt, um die Ausströmungsgeschwindigkeit zu berechnen. Wenn sich der Strahl eines Springbrunnens in ein Gewimmel von einzelnen Tropfen auflöst, so beschreibt jeder dieser Tropfen die der Richtung, in der er den Strahl verläßt, entsprechende, spitzere oder flachere Parabel. Das Gewimmel der verschieden geformten, aber doch an ein bestimmtes Gesetz gebundenen Bahnen macht auf unser Auge einen wohltuenden Eindruck, und die in der ganzen Erscheinung zum Ausdruck kommende Gesetzmäßigkeit ist ohne Zweifel ein Hauptgrund, daß wir einen Springbrunnen schön finden.

§ 238. Torricelli starb im Alter von nur 39 Jahren 1647 in Florenz. Aber er hatte lange genug gelebt, um im Gedächtnis der Nachwelt für immer fortzuleben. Und merkwürdigerweise hat gerade dieser Mann in einem Vortrage, den er in der Accademia della Crusca in Rom gehalten hat, ausgesprochen, daß der Ruhm nach dem Tode keinen Wert habe. Nach dem Tode sind für ihn alle Menschen gleich berühmt.

§ 239. Ein anderer hochbegabter Gelehrter, der ebenfalls nur ein Alter von 39 Jahren erreichte und durch den Torricellis Entdeckung des Luftmeeres eine besonders schöne Ergänzung finden sollte, ist Blaise Pascal. Er war 1623 in Clermont geboren. Sein Vater legte 1631 sein Amt in der Zollverwaltung nieder und siedelte nach Paris über, wie es scheint, um sich ganz der Erziehung seines einzigen Sohnes zu widmen. Nach einem vom Vater sorgfältig entworfenen Plan sollte der Sohn zunächst Sprachen lernen, allein durch die Unterhaltung über mathematische und naturwissenschaftliche Gegenstände, die der Vater oft mit seinen Freunden führte, wurde

Digitized by Google

die Wißbegierde des Knaben in andere Bahnen gelenkt. Als er anfing, seinen Vater über diese Dinge zu befragen, bat dieser seine Freunde, nicht mit seinem Sohn über Mathematik zu reden, auch verbarg er die in seinem Besitze befindlichen mathematischen Werke, weil er es für zweckmäßig hielt, dieses Studium erst später anzufangen. Als der Vater auf die Bitte seines Sohnes, ihn Mathematik zu lehren, nicht einging, bat ihn dieser, ihm wenigstens zu sagen, was Mathematik sei. „Es ist die Kunst, richtige Figuren zu zeichnen und deren gegenseitige Beziehungen zu finden", erklärte ihm der Vater. „Aber damit sollst du dich nicht befassen." Groß war aber das Erstaunen des Vaters, als er nach einiger Zeit in das Zimmer des zwölfjährigen Knaben kam, diesen eifrig mit mathematischen Figuren beschäftigt fand und erfuhr, daß er in Ermangelung von Lehrbüchern sich selbst eine Mathematik zu schaffen suchte. Er hatte sich für verschiedene geometrische Gebilde besondere Benennungen ausgedacht und verschiedene Sätze, wie z. B. den über die Winkelsumme des Dreiecks, selbst aufgefunden.

Fig. 243.

Blaise Pascal.

Jetzt fand es der Vater doch geraten, seinen Widerstand aufzugeben. Der Unterricht nahm seinen Anfang, und der junge Pascal machte solche Fortschritte, daß er im 16. Lebensjahre eine Abhandlung über Kegelschnitte schrieb, die die höchste Bewunderung der Freunde seines Vaters fand. Ja, Descartes, der sich ebenfalls unter ihnen befand, glaubte, der Vater wolle ihn zum besten haben, als er ihm die Arbeit als eine von seinem Sohn verfaßte bezeichnete.

Auch in anderen Studien machte Blaise Pascal schnelle Fortschritte, und zwar war er auch hier nicht bloß rezeptiv, sondern auch produktiv. Eine sehr sinnreiche Rechenmaschine und andere mathematische Kunstwerke waren die Resultate der rastlosen geistigen Tätigkeit des jungen Mannes. Aber seine Gesundheit litt in hohem Grade unter der außergewöhnlich zeitigen Reife des Geistes, und im Alter von 18 Jahren war er körperlich vollständig gebrochen.

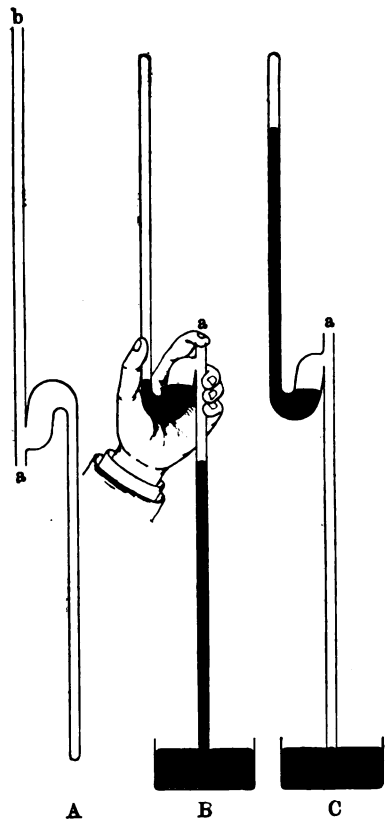
§ 240. Im Jahre 1644 hörte er durch Mersenne (§ 171), einen der

Digitized by Google

Freunde seines Vaters, der mit den meisten Physikern der damaligen Zeit in Briefwechsel stand, vom Torricellischen Versuch. Er wiederholte den Versuch sowohl mit Quecksilber, als auch mit Wein (in einem 40 Fuß langen Rohr) und hatte das Vergnügen, den viel umstrittenen leeren Raum kennen zu lernen, über den er im Jahre 1647 eine Abhandlung geschrieben hatte, noch ehe er eine Ahnung vom Luftdruck hatte, denn Mersenne hatte nur über den Versuch, nicht über die Erklärung desselben berichtet.

In demselben Jahr lernte er auch die Erklärung kennen, die er sehr schön fand und deren Richtigkeit er nicht bezweifelte. Allein er hielt sie nicht für hinreichend bewiesen und gab selbst zwei sehr schöne Beweise für die Richtigkeit derselben. Den einen, den er den Beweis für das Leere im Leeren nannte, führte er mit einem einfachen Apparat aus. Ein Glasrohr von der Form Fig. 244 *A* mit je einer Öffnung bei *a* und bei *b* wird zunächst in schiefer Stellung vollständig mit Quecksilber gefüllt, während die Öffnung *a* mit dem Finger zugehalten wird. Dann wird auch die Öffnung *b* mit einem Finger der anderen Hand zugehalten, das Rohr umgekehrt und mit dem Ende *b* in die Quecksilberschale *B* gesetzt und endlich der Finger von der Öffnung *b* (aber nicht von *a*) entfernt. Ein Teil des Quecksilbers sinkt in die Schale, und es bleibt in dem Rohr *ab* eine Säule von der Höhe des Barometerstandes und eine gewisse Menge Quecksilber in dem gebogenen Teil des Rohrs zurück, die aber in dem langen Schenkel nicht höher steht als in dem erweiterten Schenkel, denn es ist vorläufig nichts da, was auf das Quecksilber drückt. Nun wird der Finger von der Öffnung *a* entfernt, an die er stark angesogen wurde, und in demselben Augenblick sinkt die Säule *ab* vollständig in die Schale hinab, während das Quecksilber in der Umbiegung in das obere Rohr bis zur Höhe des Barometerstandes hineingetrieben wird (Fig. 244 *C*). Es ist also klar, daß das Steigen des Quecksilbers in das obere Rohr nicht von einer inneren Zusammenziehung herrührt, sondern nur eintritt, wenn die Luft auf das Quecksilber im anderen Schenkel drücken kann.

Fig. 244.



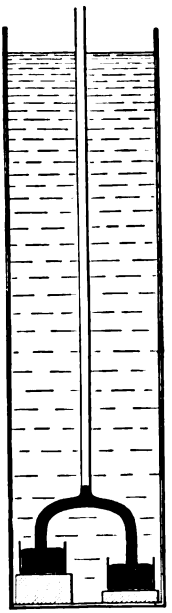
Versuch Pascals über den Luftdruck.

Digitized by Google

§ 241. Der andere Beweis, den Pascal ersann, bestand darin, daß er untersuchte, ob der Luftdruck auf dem Gipfel eines Berges geringer ist als am Fuße des Berges. Denn wenn es das Gewicht der Luft ist, welches das Quecksilber im Barometer in die Höhe treibt, so muß der Barometerstand auf dem Gipfel des Berges geringer sein, weil über diesem eine weniger hohe Luftschicht schwebt, als über einem am Fuß des Berges gelegenen Punkt. Ein Schwager Pascals, Perrier in Clermont, wurde 1648 ersucht, die Sache am Berg Puy de Dôme zu untersuchen. Er ließ am Fuß des Berges ein Barometer beobachten, während er selbst den Berg bestieg und auf dem Gipfel den Barometerstand beobachtete. Es ergab sich, daß der Barometerstand auf dem Gipfel 3″ 1,5‴ niedriger war als am Fuße des Berges. Dieser Versuch brachte zugleich größere Klarheit in die Auffassung der Luft als eines Meeres. Je mehr man sich der Oberfläche dieses Meeres nähert, desto geringer wird der Druck, den es ausübt.

§ 242. Nach der Entdeckung des Luftmeeres und des Luftdruckes mußte die von Heron aufgestellte Theorie des Hebers (§ 211) geändert werden. Nicht die Unmöglichkeit des leeren Raumes ist die Ursache, daß sich die Flüssigkeit im Heber nicht teilt und in beiden Schenkeln abfließt, sondern der Druck der Luft. Daher hört der Heber auf zu wirken, wenn er so hoch ist (über 32 Fuß), daß das Wasser nicht bis oben hin durch den Luftdruck im Gleichgewicht gehalten werden kann. Um dies zu bewirken, konstruierte Pascal den in Fig. 245 abgebildeten Apparat. Auf dem Boden eines hohen mit Wasser gefüllten Gefäßes stehen zwei mit Quecksilber gefüllte Schalen. Das Quecksilber der einen Schale steht durch ein gebogenes Rohr mit dem Quecksilber der anderen Schale in Verbindung. Von dem oberen Teil des Verbindungsrohrs geht ein gerades Rohr durch das Wasser bis in die Luft. Das Wasser treibt durch seinen Druck das Quecksilber in dem gabelförmigen Rohr in die Höhe. Wird nun das eine Quecksilbergefäß etwas gehoben, so strömt das Quecksilber aus dem ersten Gefäß in das zweite, aber nur dann, wenn der Wasserdruck auf das Quecksilber so groß ist, daß das Verbindungsrohr vom Quecksilber vollständig angefüllt wird. Wenn von dem Wasser so viel entfernt wird, daß das Quecksilber in den beiden Schenkeln des Rohrs getrennt steht, so hört der Quecksilberheber auf zu wirken.

Fig. 245.



Pascals Apparat für die Wirkung des Hebers.

In Übereinstimmung hiermit fand Pascal, daß ein Wasserheber von 40 Fuß Höhe nicht wirkt. Wenn er aber schief gehalten wird, so daß seine vertikale Höhe kleiner als 32 Fuß wird, so fängt er an zu wirken. Ebenso

Digitized by Google

wirkt ein Queckſilberheber von 1 m Länge nur dann, wenn er in eine hinreichend ſchiefe Lage gebracht wird.

§ 243. Pascal hatte auch den Druck der Flüſſigkeiten ſtudiert und, ohne die Arbeiten Stevins (§ 187) zu kennen, von neuem die ſogenannten Pascalſchen Gefäße konſtruiert, und er hat in höherem Grade als Torricelli das Verdienſt, bewieſen zu haben, daß die Geſetze für den Druck der Flüſſigkeiten im weſentlichen auch für die Luft gelten. Er machte Berechnungen wie die folgende.

Das Luftmeer, welches die Erde umhüllt, muß dasſelbe Gewicht haben wie ein Waſſermeer von 32 Fuß Tiefe oder ein Queckſilbermeer von 0,76 m Tiefe. Wenn man nun die Größe der Erdoberfläche kennt, ſo kann man das Gewicht des geſamten Luftmeers berechnen. Wenn man den Erdradius gleich 860 Meilen annimmt, ſo iſt die Oberfläche ungefähr 9 Millionen Quadratmeilen. Das Gewicht des Luftmeeres iſt gleich dem Gewicht von $^{32}/_{24000} \times 9000000$ oder ungefähr 12000 Kubikmeilen Waſſer.

Auf jedem Quadratzoll der Erdoberfläche laſtet ein Druck gleich dem Gewicht einer Waſſerſäule von 32 Fuß Höhe und 1 Quadratzoll Querſchnitt. Dieſe Waſſerſäule hat $^{32}/_{144} = {}^{2}/_{9}$ Kubikfuß Inhalt und wiegt alſo 14 Pfund, da ein Kubikfuß Waſſer 62 Pfund wiegt [1]). Dieſer Druck iſt nicht nur in der Richtung von oben nach unten, ſondern nach den Geſetzen des Druckes in Flüſſigkeiten auch als Seitendruck und als Druck von unten nach oben vorhanden. Auf der Oberfläche des menſchlichen Körpers laſtet daher, wenn man dieſe gleich 12 Quadratfuß annimmt, ein Druck von $12 \times 144 \times 14 = 24192$ Pfund. Pascal macht jedoch darauf aufmerkſam, daß auch ein entſprechender Druck von innen nach außen vorhanden iſt, und zwar nicht nur in der Lunge und anderen Hohlräumen, in denen ſich das Luftmeer verzweigt. Auch in den Geweben des Körpers iſt Luft mit dem entſprechenden Druck vorhanden. Dieſer Druck bewirkt, daß die Haut in einen Fingerhut, aus dem man die Luft herausgeſogen hat, hineingezogen wird, daß das Blut beim Schröpfen in den Schröpfkopf einſtrömt, u. ſ. w. Eine plötzliche Verminderung des äußeren Druckes hat zur Folge, daß das Blut aus den feinſten Gefäßen in den Augen, der Naſe u. ſ. w. austritt. Dagegen kann eine langſame Änderung des Luftdruckes ertragen werden, da ſich der innere Druck nach und nach dem äußeren anpaßt. Unter dieſer Vorausſetzung iſt es möglich, daß ein Menſch noch unter einem Viertel Atmoſphärendruck lebt, und man erträgt es gut, daß der Druck langſam auf mehrere Atmoſphären ſteigt.

§ 244. Zur Zeit Pascals hatten ſich die Anhänger des holländiſchen Theologen Janſen im Ciſtercienſerkloſter Port-Royal bei Fontainebleau niedergelaſſen, zu dem auch eine Beſitzung in Paris gehörte. Dieſe ſogenannten Janſeniſten hatten ſich der Auguſtiniſchen Lehre von Gottes unendlicher Gnade

[1]) Der Druck der Luft auf ein Quadratzentimeter iſt ungefähr gleich einem Kilogramm.

Digitized by Google

angeschlossen und waren bestrebt, nach den ursprünglichen Grundsätzen der Kirche in Arbeitsamkeit, Enthaltsamkeit und Nächstenliebe zu leben. Hierdurch kamen sie in starken Konflikt mit den Jesuiten. Pascal fühlte sich mehr und mehr zu den Jansenisten hingezogen. Im Alter von 27 Jahren gab er seine wissenschaftliche Tätigkeit vollständig auf, da er zu der Überzeugung gekommen war, daß nur diejenige Zeit gut angewendet sei, die zum Beten, zu religiösen Betrachtungen und zur Betätigung christlicher Nächstenliebe verwendet wird. Zuweilen kam aber doch seine ursprüngliche Natur wieder zum Durchbruch. So war einmal die Frucht einer schlaflosen Nacht eine Arbeit über die Cykloide, die die Bewunderung aller Mathematiker der damaligen Zeit erregte. Er las früh und spät in der Bibel und lernte sie fast auswendig, auch entwickelte er eine großartige schriftstellerische Tätigkeit in religiöser Richtung. Er verteidigte die Jansenisten gegen die Jesuiten in einer Reihe von (anonym erschienenen) Briefen, den sogenannten Provinzialbriefen, die nach und nach zu den unwiderstehlichsten Angriffen auf die Jesuiten übergingen. Sie erschienen in mehr als 60 Auflagen und waren von großer Bedeutung für die Entwickelung der französischen Schriftsprache. — Pascal starb 1662.

§ 245. Während Pascal in Frankreich seine Aufmerksamkeit dem Luftmeer und den Wirkungen desselben im großen zuwandte, richteten andere — man kann wohl sagen aus mystischer Neugierde — ihren Blick mehr auf den leeren Raum oder die Torricellische Leere, wie er auch genannt wurde. Dieser merkwürdige Raum, der nichts enthält, dessen Vorhandensein man von jeher bezweifelt, ja geleugnet hatte, existierte doch, und welche merkwürdigen Eigenschaften konnte er nun möglicherweise haben! Die Neugierde, die durch die Entdeckung Torricellis hervorgerufen worden war, pflanzte sich weit hin fort und drang schließlich in Kreise ein, in denen man nicht mehr wußte, wodurch sie eigentlich hervorgerufen worden war. So konnte es kommen, daß die Sache in einer ganz neuen Art in Angriff genommen wurde und daß ganz neue Resultate gefunden wurden.

Fig. 246.

Otto von Guericke.

Digitized by Google

Von den Männern, die durch die Wellen, welche die Frage des leeren Raumes in der Mitte des 17. Jahrhunderts ſchlug, zum Experimentieren angeregt wurden, iſt namentlich Otto von Guericke hervorzuheben. Er war weniger ein gelehrter Phyſiker, als ein geſchickter Experimentator. Er war als Sohn des Schultheiß Johann Gericke 1602 in Magdeburg geboren. Er ſtudierte zuerſt in Leipzig, Helmſtedt und Jena Rechtswiſſenſchaft. Dann ging er nach Leiden, um ſich dem Studium der Mathematik und Mechanik zu widmen. Dies war im Jahr 1623, alſo kaum drei Jahre nach dem Tode Stevins, und Guericke hat ohne Zweifel den jungen, hochbegabten Snellius gehört, der damals Profeſſor der Mathematik in Leiden war (§ 106). Nachdem er Frankreich und England bereiſt hatte, zog er ſich in ſeine Vaterſtadt

Fig. 247.

Auspumpen eines Faſſes (Guericke).

zurück, wo er 1627 Ratsherr wurde. Nach der Zerſtörung von Magdeburg trat er in ſchwediſche Dienſte und wurde Oberingenieur in der Feſtung Erfurt. Im Jahre 1646 wurde er Bürgermeiſter von Magdeburg. Dieſes Amt bekleidete er eine lange Reihe von Jahren. Im Alter von 79 Jahren zog er ſich zurück und verlebte ſeine letzten fünf Jahre bei ſeinem Sohn in Hamburg, wo er 1686 ſtarb.

Als Guericke anfing, ſich mit Verſuchen über den leeren Raum zu beſchäftigen, hatte er merkwürdigerweiſe, wie es ſcheint, gar keine Kenntnis von den Verſuchen Torricellis und Pascals, durch die doch das Intereſſe für dieſe Sache erregt worden war.

Digitized by Google

§ 246. Guericke wollte einfach einen leeren Raum dadurch erzeugen, daß er das Waſſer aus einem Faſſe, in welches keine Luft eindringen konnte, herausſchaffte. Er füllte ein Faß mit Waſſer, wendete es mit dem Spund nach unten (Fig. 247, a. v. S.) und ſchraubte in dieſem das Rohr einer damals als Feuerſpritze dienenden Meſſingſpritze feſt. Es war bei *a* mit einem Hahn

Fig. 248.

Auspumpen einer kupfernen Kugel (Guericke).

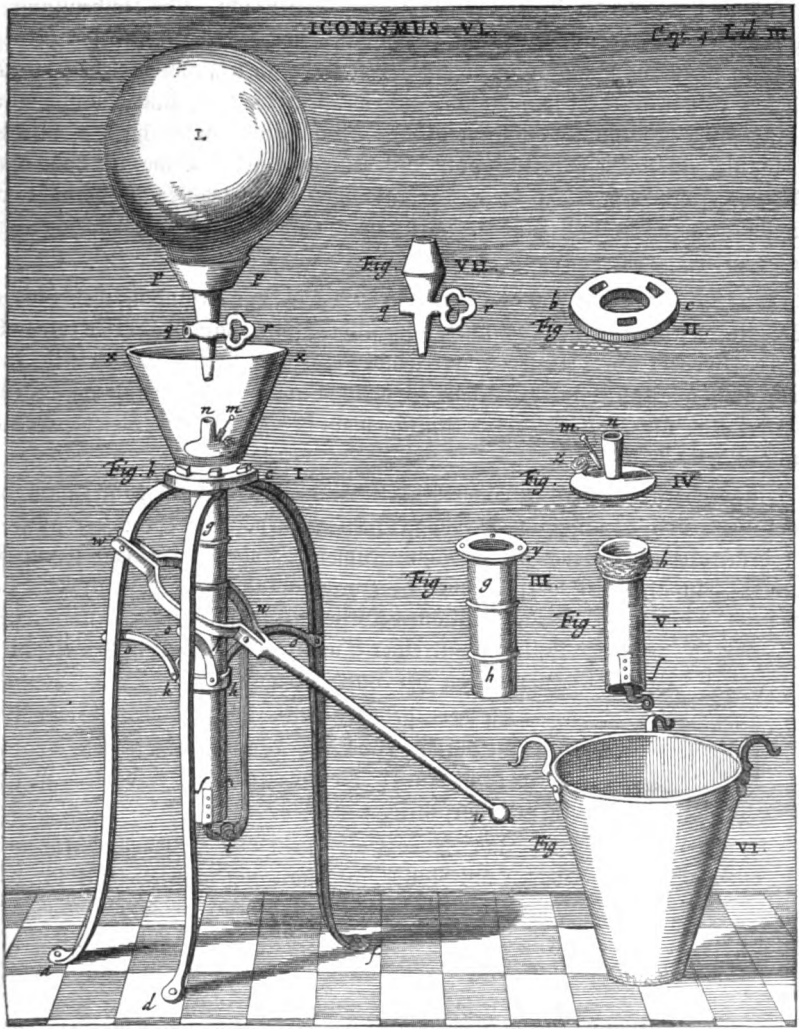
verſehen, durch den das Waſſer aus dem Faß in die Spritze eintreten konnte. Das in die Spritze gezogene Waſſer konnte dann durch einen Hahn *b* aus dem Rohr herausgedrückt werden. Den Kolben herauszuziehen, war „für drei ſtarke Männer“ ſchwerer, als Guericke erwartet hatte, und das erſte Mal ging der Apparat entzwei. Das zweite Mal hielt der Apparat, aber man hörte ein ſtarkes Sieden in dem Faſſe, und Guericke erkannte ſofort, daß die Luft durch das Holz eindrang. Guericke ſetzte nun das Faß in ein größeres mit Waſſer gefülltes Faß. Jetzt konnte jedenfalls keine Luft in das Faß kommen, welches ausgepumpt wurde, denn es war von allen Seiten von Waſſer umgeben, und Waſſer dringt, wie Guericke dachte, nicht ſo leicht durch das Holz wie Luft.

Nun ging es aber überhaupt nicht. Die drei ſtarken Männer konnten den Spritzenkolben nicht in Bewegung ſetzen. Guericke meinte, es ſei vielleicht leichter, Luft auszupumpen als Waſſer, und konſtruierte daher eine

Digitized by Google

große kupferne Kugel mit einem Hahn. Diese Kugel wurde nicht mit Wasser gefüllt, sondern ohne weiteres an der Spritze befestigt (Fig. 248). Anfangs ging das Pumpen leicht, aber es wurde immer schwerer, und zuletzt konnten

Fig. 249.



O. v. Guerickes Luftpumpe.

zwei „vierschrötige" Männer (*viri quadrati*) den Kolben kaum noch in Bewegung setzen, und kaum war man fertig, so brach die Kugel mit einem gewaltigen Knall zusammen.

Digitized by Google

Guericke ließ darauf eine stärkere Kugel anfertigen. Mit dieser gelang der Versuch, wenn es auch Arbeit kostete, und als Guericke den Hahn öffnete, hatte er die Freude, die Luft zischend in die Kugel eindringen zu hören.

§ 247. Nach diesen vorläufigen Versuchen konstruierte Guericke eine besondere Luftpumpe, Fig. 249 (a. v. S.). Unter der Mitte eines dreibeinigen Stativs ist der Zylinder in vertikaler Stellung angebracht. Die Kolbenstange *f*, welche von unten her in den Zylinder eintritt, wird durch den Hebel *n* bewegt. Im übrigen ist die Pumpe mit einem Ventil und einem Hahn versehen wie die früheren Apparate, aber der Raum, aus welchem die Luft ausgepumpt wird, ist eine große Glaskugel *L*, an die das Stück mit dem Hahn *qr* luftdicht angeschliffen ist. Dieses Stück paßt mit seinem unteren Ende in das obere Ende des Zylinders. Da diese Verbindungen aber leichter wasserdicht als luftdicht herzustellen sind, sind sie mit dem Gefäß *xx* umgeben, welches mit Wasser gefüllt wird.

§ 248. Wenn wir nun die zahlreichen Versuche überblicken, welche Guericke mit dieser Maschine ausführte, so finden wir, daß Guericke eine besondere Vorliebe für Aufsehen erregende Versuche hatte. Anderseits muß jedoch auch anerkannt werden, daß er bestrebt war, das menschliche Wissen zu erweitern, und daß er auch ziemlich wichtige Dinge auf diesem Gebiete gefunden hat.

Zu den Knalleffekten im eigentlichen Sinne des Wortes kann man das Auspumpen von dünnwandigen Glasgefäßen rechnen. Der Druck der äußeren Luft drückt sie ebenso wie die erwähnte kupferne Kugel mit einem Knall zusammen. Ein ähnlicher Versuch wird heutzutage häufig in der durch Fig. 250 veranschaulichten Weise ausgeführt, indem man einen Zylinder mit einer Tierblase zubindet und diese durch Auspumpen der Luft sprengt.

Fig. 250.

Sprengen einer Tierblase durch den Luftdruck.

Hierher gehört auch der großartige Versuch, den Guericke 1654 auf dem Reichstag von Regensburg dem Kaiser Ferdinand III. und den Reichsfürsten vorführte.

Zwei hohle Halbkugeln von $^2/_3$ Ellen Durchmesser waren am Rande so genau abgeschliffen, daß sie vollkommen luftdicht schlossen, wenn sie etwas mit Talg geschmiert und aneinander gedrückt wurden. Durch eine mit einem Hahn versehene Öffnung wurde die Luft ausgepumpt, und dann wurden an jede Halbkugel acht Pferde angespannt (Fig. 251). Nur mit großer Mühe zogen sie die Halbkugeln auseinander, und als dies geschah, ertönte ein gewaltiger Knall. — Der Querschnitt der Kugel war ungefähr gleich 200 Quadratzoll, und wenn die Luft einigermaßen vollständig ausgepumpt war, so wurden die Halbkugeln mit einem Druck von 200 × 14 oder 2800 Pfund auf jede Halbkugel zusammengedrückt. Ein ähnlicher Apparat in kleinerem Maßstab

Digitized by Google

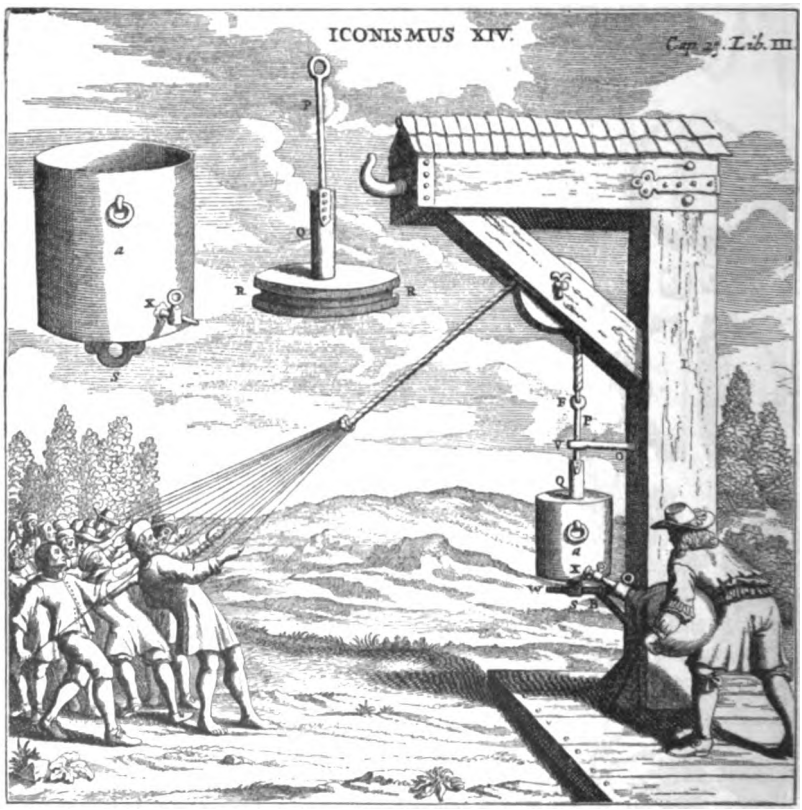
Die Magdeburger Halbkugeln auf dem Reichstag zu Regensburg, 1654.

Digitized by Google

findet sich heutzutage unter dem Namen „Magdeburger Halbkugeln“ in jeder Schulsammlung physikalischer Apparate.

Bei derselben Gelegenheit führte Guericke einen Versuch aus, bei dem 50 starke Männer nicht imstande waren, der Wirkung Widerstand zu leisten, die durch eine kleine Fingerbewegung einer einzigen Person ausgeübt wird. Ein kupferner Zylinder von $^3/_4$ Ellen Durchmesser ist an einem hölzernen Pfosten befestigt (Fig. 252). Von der Kolbenstange geht über eine Rolle ein Seil, welches sich am Ende so verzweigt, daß gleichzeitig 50 Personen an

Fig. 252.



Der Luftdruck überwindet 50 Mann.

demselben ziehen können. Der untere Teil des Zylinders steht in Verbindung mit einer luftleeren Kugel, die einstweilen durch einen Hahn verschlossen ist. Nun werden die 50 Mann aufgefordert, mit aller Kraft zu ziehen, wodurch der Kolben etwas in die Höhe gezogen wird. Dann wird der Hahn geöffnet und also der Zylinder mit der luftleeren Kugel in Verbindung gesetzt. Es

Digitized by Google

tritt etwas Luft aus dem Zylinder in die Kugel über, und die 50 Mann können den Kolben nicht mehr in derselben Höhe wie vorher festhalten, sondern sie müssen etwas nachgeben.

§ 249. Erst auf dem genannten Reichstage hörte O. v. Guericke von den Entdeckungen Torricellis und Pascals, aber er hatte damals diese Entdeckungen bereits auf eigene Hand und in anderer Weise gemacht (Fig. 253, a. f. S.). Er hatte verschiedene Röhren miteinander luftdicht verbunden, so daß sie zusammen ein Rohr von 19 Magdeburger Ellen Länge bildeten. An den Verbindungsstellen sind ringförmige Rinnen angebracht, die zur Erzielung einer möglichst vollkommenen Dichtung mit Wasser gefüllt werden. Am oberen geschlossenen Ende ist ein Seitenrohr mit Hahn angebracht. Dieses wird mit einer luftleeren Kugel verbunden, und durch Öffnen des Hahns wird die Luft aus dem langen Rohr herausgesogen. Das Wasser steigt in dem Rohr, und wenn es so hoch gekommen ist, als es durch wiederholtes Aussaugen vermittelst der luftleeren Kugel gebracht werden kann, wird der Hahn geschlossen. Auf einem Stück Kork, welches auf dem Wasser schwimmt, ist eine kleine menschliche Figur befestigt, die auf die am Glase angebrachten Marken deutet. Guericke bemerkte, daß die Wassersäule fortwährend steigt und sinkt, und daß diese Schwankungen mit der Änderung des Wetters in Zusammenhang stehen. Er nannte daher die auf dem Wasser schwimmende Figur das Wettermännchen.

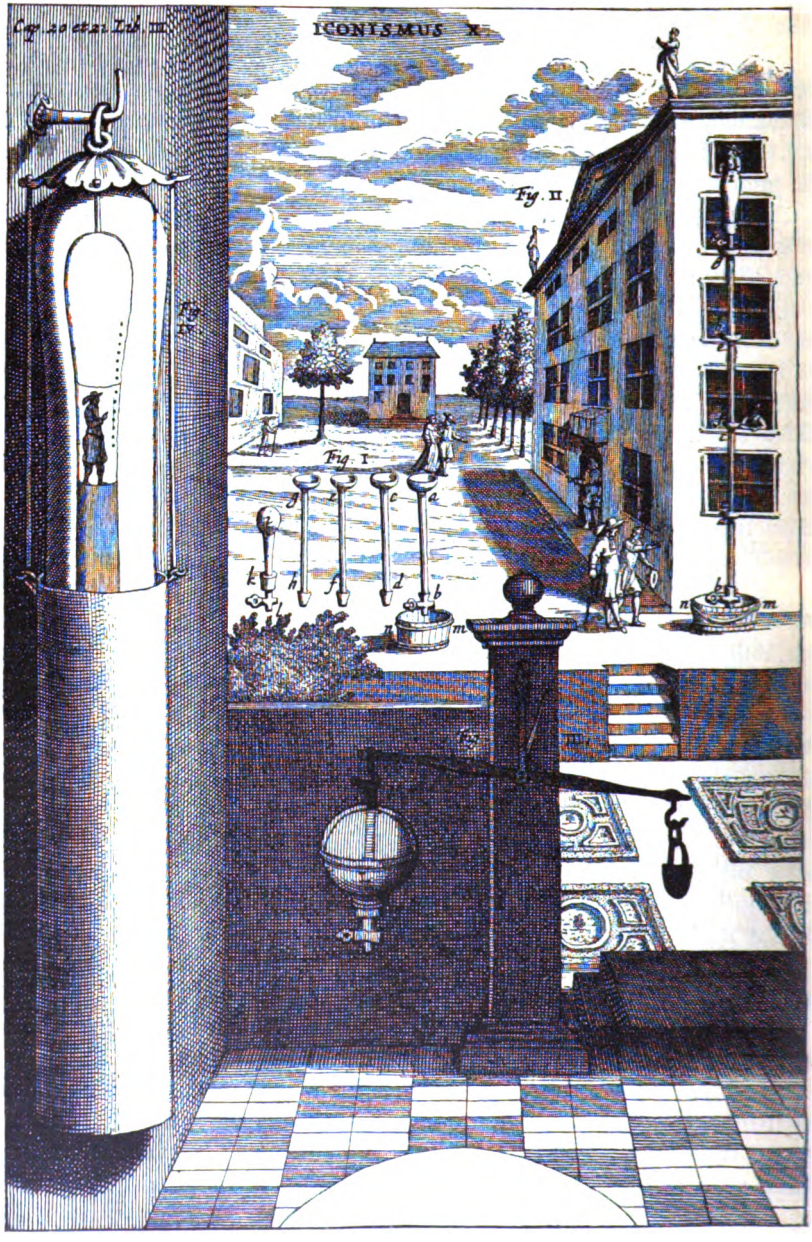
§ 250. Guericke erkannte auch, daß die Erscheinung durch das Gewicht der Luft hervorgerufen wird. Er wog eine Hohlkugel im luftleeren Zustande, mit Luft gefüllt und mit Wasser gefüllt, er bemühte sich jedoch nicht, einen bestimmten Zahlenwert für das Gewicht der Luft abzuleiten, denn die Luft — sagt er — wiegt nicht immer gleich viel. Er begnügte sich mit der Herstellung des Apparates, der im Vordergrunde der Fig. 253 abgebildet ist und der die Veränderlichkeit des Gewichtes der Luft anzeigt. Eine große luftleere Hohlkugel an dem einen Ende eines Wagebalkens wird durch ein Gewicht von geringerem Umfang am anderen Ende im Gleichgewicht gehalten. Wenn daher die Metallmassen beider Kugeln genau dasselbe Gewicht haben, so sind die Kugeln nicht im Gleichgewicht, denn die größere verdrängt eine größere Menge Luft, und es wirkt daher auf sie ein größerer Auftrieb. Es zeigt sich aber, daß der Auftrieb zu verschiedenen Zeiten verschieden ist, daß also die verdrängte Luft nicht immer dasselbe Gewicht hat. Wenn durch den Apparat nur die Veränderlichkeit des Auftriebs gezeigt werden soll, so ist es natürlich gar nicht nötig, daß die größere Kugel luftleer ist.

§ 251. Guericke beobachtete das Verhalten verschiedener Gegenstände im luftleeren Raume. Wenn er den Hahn plötzlich unter Wasser öffnete, bemerkte er, daß der Wasserstrahl beim Anprallen gegen die Kugel einen harten Klang erzeugte, als ob es ein fester Körper wäre. Wenn das Wasser in der Luft gegen einen festen Gegenstand anprallt, so entsteht nur ein dumpfer Klang, weil die Luft sozusagen einen Puffer bildet.

Ein brennendes Licht erlosch, wenn die Luft ausgepumpt wurde, weil, wie er sagt, die Luft das Feuer nährt. Vögel sterben im leeren Raum,

Digitized by Google

Fig. 253.



Guerickes Wetterprophet und Apparat zum Nachweise, daß die Luft Gewicht hat

Digitized by Google

Fische schwellen auf und zerplatzen schließlich. Eine Traube hielt sich im leeren Raume über ein halbes Jahr lang frisch. Eine Glocke gab keinen Ton im leeren Raum.

§ 252. Wurde Wasser in den Raum gebracht und dann die Luft ausgepumpt, so stiegen Luftblasen im Wasser auf. Guericke, der die Luft nicht als etwas Selbständiges, sondern als die Ausdünstung der Dinge betrachtete, erklärte die Erscheinung als ein Austreten des Dunstes aus dem Wasser.

Die richtige Erklärung dieser Erscheinung wurde erst von dem französischen Physiker Nollet (1700 bis 1770) gegeben. Wasser, welches mit Luft in Berührung steht, nimmt von dieser etwas auf. Wenn dann das Wasser erwärmt oder der Luftdruck von der Oberfläche entfernt wird, so entweicht die Luft aus dem Wasser. Von verschiedenen Luftarten nimmt das Wasser verschiedene Mengen auf. — Auch andere Flüssigkeiten, ja sogar feste Körper besitzen das Vermögen, Gase aufzusaugen. Diese Erscheinung, die sogenannte Diffusion oder Endosmose, spielt in der Natur eine sehr wichtige Rolle. Die im natürlichen Wasser gelöste Luft ist es, die die Atmung der Fische unterhält. Von festen Körpern besitzt namentlich die poröse Kohle (Holzkohle, Tierkohle) ein großes Absorptionsvermögen für Gase. Hierauf beruht die Wirkung, welche sie in künstlichen Filtern ausübt.

§ 253. Guericke ging bei seinen ersten Versuchen von der Annahme aus, daß sich die Luft infolge ihres Gewichtes auf dem Boden der Gefäße ansammle. Er bewirkte daher immer das Aussaugen am Boden des Gefäßes, welches luftleer gemacht werden sollte. Er dachte sich, wenn die Hälfte der Luft ausgepumpt sei, so befinde sich die andere Hälfte im unteren Teile des Gefäßes, während der obere Teil desselben luftleer sei. Daß diese Annahme nicht den Tatsachen entspricht, erkannte er jedoch, als er einmal zwei Behälter, von denen der untere Luft enthielt und der obere luftleer war, mit den Hälsen untereinander verbunden hatte. Als er den Hahn zwischen beiden Behältern öffnete und sie dann voneinander trennte, merkte er, daß die Luft in beide gleich stark eindrang. So fand er, daß die Luft nicht einen bestimmten Raum einnimmt wie das Wasser, sondern daß sie jeden beliebigen auch noch so großen Raum einnehmen kann. Daß sich die Luft auch zusammendrücken läßt, war ja seit langer Zeit bekannt gewesen.

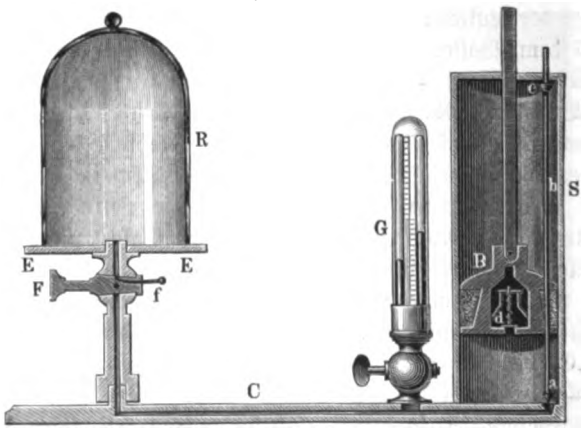
§ 254. Guericke erkannte auch, daß der Luftdruck, da er durch das Gewicht der Luft verursacht wird, an höher gelegenen Punkten geringer sein muß als an tiefer gelegenen, was ja bereits Pascal nachgewiesen hatte. Folglich muß die Luft an höher gelegenen Punkten weniger stark zusammengedrückt sein. Um sich hiervon zu überzeugen, nahm Guericke eine große Flasche, die mit einem Hahn versehen war, und schloß den Hahn am Fuße eines Turmes, so daß die Flasche mit Luft von der Dichtigkeit, die sie an dieser Stelle hatte, gefüllt war. Dann stieg er auf die Spitze des Turmes, öffnete hier den Hahn und fand, wie er erwartet hatte, daß etwas Luft aus der Flasche ausströmte. Er fügt ausdrücklich hinzu, daß er darauf bedacht

Digitized by Google

gewesen sei, die Temperatur der Flasche unverändert zu erhalten, denn er wußte wohl, daß die Erwärmung der eingeschlossenen Luft das Ausströmen einer gewissen Menge zur Folge gehabt haben würde.

§ 255. Als die Versuche Guerickes in England bekannt wurden, bildeten sie für Robert Boyle die Veranlassung, sich mit der Luftpumpe zu beschäftigen. Er verbesserte die Luftpumpe und untersuchte eine Menge von Erscheinungen im leeren Raum. Auch Huygens verbesserte den Apparat, und nach seiner Anweisung setzte Denis Papin zuerst allein, dann gemeinsam mit Boyle die Untersuchungen weiter fort. Diese Männer waren es hauptsächlich, durch deren Tätigkeit die Luftpumpe das durch Fig. 254

Fig. 254.



Heutige Form der Luftpumpe, von der Seite gesehen.

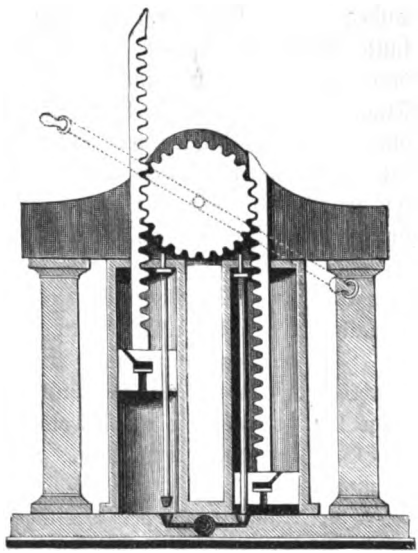
und 255 veranschaulichte Aussehen bekommen hat. Rechts sieht man den Zylinder (Stiefel). Im Kolben befindet sich ein Ventil *d*, welches sich nach oben, d. h. nach außen öffnet. Ein anderes Ventil von der Form eines Stopfens ist an einer Stange angebracht, die durch den Kolben und den Deckel des Zylinders hindurchgeht, und zwar durch den ersteren luftdicht. Am oberen Ende hat die Stange einen Ansatz. Wenn der Kolben in die Höhe gezogen wird, führt er die Stange mit, so daß das Ventil *a* geöffnet wird. Beim Herabgehen des Kolbens wird das Ventil geschlossen. Die unter dem Kolben abgesperrte Luft entweicht durch das Ventil *d*. Die Öffnung *a* steht durch einen Kanal mit der Mitte einer eben geschliffenen Glasplatte, des „Tellers", in Verbindung. Auf den Teller setzt man die Glasglocke (den Rezipienten), welche luftleer gemacht werden soll, nachdem man den abgeschliffenen Rand derselben mit Talg bestrichen hat, damit sie vollkommen luftdicht auf dem Teller sitzt.

Jedesmal, wenn der Kolben in die Höhe gezogen wird, tritt die Luft, welche in der Glocke, dem Verbindungskanal und dem allerunterſten Teil des Zylinders, dem „schädlichen Raum", enthalten ist, zum Teil in den Zylinder.

Digitized by Google

Sie erleidet also eine Verdünnung, deren Grad vom Volumen der Glocke und dem Volumen des Zylinders abhängt. Wenn der Kolben herabgedrückt wird, so entweicht die Luft aus dem Zylinder in der angegebenen Weise. Wir wollen vom „schädlichen Raum", der so klein wie möglich sein muß, absehen und z. B. annehmen, das Volumen der Glocke nebst Verbindungsrohr sei 2 Liter, das Volumen des Zylinders 1 Liter. Dann wird die Dichtigkeit der Luft nach dem ersten Kolbenzug $^2/_3$ der ursprünglichen Dichtigkeit sein. Nach zwei Kolbenzügen ist also die Dichtigkeit $^2/_3 \cdot {}^2/_3$ oder $^4/_9$, nach dem dritten Kolbenzug $^8/_{27}$, nach dem vierten $^{16}/_{81}$ u. s. w. der ursprünglichen Dichtigkeit. Nach dem zehnten Kolbenzug ist sie $^{1024}/_{59049}$ oder ungefähr $^1/_{58}$ der ursprünglichen.

Fig. 255.



Heutige Form der Luftpumpe, von vorn gesehen.

Durch einen Hahn in dem Rohr *C* kann die Verbindung zwischen dem Zylinder und der Glocke unterbrochen werden, um zu verhindern, daß aus dem Zylinder, falls dieser nicht ganz dicht ist, Luft in die ausgepumpte Glocke eindringt. Der Verbindungskanal zwischen dem Cylinder und der Glocke steht mit der kleinen Glasglocke *G* in Verbindung, in welcher ein „abgekürztes" Barometer angebracht ist, an dem man den Druck der eingeschlossenen Luft ablesen kann, durch den der Grad der erreichten Verdünnung angegeben wird.

Eine der von Boyle eingeführten Verbesserungen der Luftpumpe besteht darin, daß gleichzeitig zwei Pumpen in Tätigkeit gesetzt werden (Fig. 253) und zwar so, daß der eine Kolben nach unten geht, während der andere nach oben geht. Auf diese Weise wird die Arbeit beschleunigt, und indem beide Kolben durch denselben Mechanismus bewegt werden (das Zahnrad mit zwei Zahnstangen ist eine Erfindung von Boyles jüngerem Zeitgenossen Hawksbee), wird die Arbeit, die zum Emporziehen des einen Kolbens erforderlich ist, durch den Druck der Luft auf den anderen Kolben vermindert.

Robert Boyle führte ähnliche Untersuchungen über die Erscheinungen im leeren Raum aus wie Guericke und zwar, wie es scheint, mit größerer Genauigkeit. Andere Beobachtungen, die die Wärme betreffen, werden später erwähnt werden.

§ 256. Wie schwer es gewesen sein muß, sich von der alten Auffassung, daß sich der leere Raum mit großer Kraft zusammenzuziehen strebt, loszu-

Digitized by Google

machen, kann man daraus ersehen, daß es Gelehrte gab, die trotz der Versuche von Torricelli, Pascal, Guericke und Boyle nicht von der Richtigkeit der neuen Auffassung überzeugt waren. So machte z. B. Franciscus Linus, Professor in Lüttich (1595 bis 1675), den Einwand, daß die Quecksilbersäule in dem langen Rohr eines Barometers nicht herabsinke, wenn man die Öffnung des kurzen Schenkels, durch die die Atmosphäre wirken sollte, zuhalte. Man antwortete, daß in dem kurzen Schenkel, auch wenn die Mündung zugehalten werde, immer noch etwas Luft enthalten sei, die dann das Quecksilber im anderen Schenkel hochhalte. Linus nahm ein an beiden Enden offenes Glasrohr, hielt die untere Öffnung mit dem Finger zu und füllte es mit Quecksilber. Dann hielt er auch die obere Öffnung zu, setzte das untere Ende in eine Schale mit Quecksilber und entfernte dann den Finger von der unteren Öffnung. Er hatte dann ein Barometer, welches oben durch den Finger verschlossen war, und dieser Finger, so meinte Linus, fühlte die saugende Kraft des leeren Raumes, denn die Haut des Fingers wurde in das Rohr hineingezogen. Im leeren Raum, sagte Linus, sind unsichtbare „Fäden" vorhanden, die die Wände desselben zusammenziehen, unsichtbare Fäden zwischen dem Quecksilber und der Haut des Fingers. — Linus beharrte bei dieser Vorstellung, trotzdem Pascal dieselbe Beobachtung gemacht und richtig erklärt hatte (§ 243).

§ 257. Jetzt unternahm Boyle eine gründliche Untersuchung des Umstandes, der am meisten der Aufklärung bedurfte, daß nämlich eine so geringe Menge Luft, die im Barometer abgesperrt wurde, der Quecksilbersäule das Gleichgewicht halten kann. Hierbei machte er eine sehr wichtige Entdeckung.

Zur Ausführung der Versuche diente ein umgebogenes Glasrohr mit einem langen offenen und einem kurzen geschlossenen Schenkel (Fig. 256). Zunächst wird durch Eingießen von etwas Quecksilber ein gewisses Volumen Luft in dem geschlossenen Schenkel abgesperrt. Da das Quecksilber in beiden Schenkeln gleich hoch steht, befindet sich die abgesperrte Luft unter dem Druck, den das Luftmeer ausübt, d. h. unter dem Druck einer Atmosphäre. Nun wird mehr Quecksilber in das lange Rohr gegossen, und man beobachtet, daß das Volumen der eingeschlossenen Luft um so kleiner wird, je mehr Quecksilber eingegossen wird. Wenn das Volumen der Luft halb so groß als das ursprüngliche Volumen geworden ist (Fig. 256 *B*), so steht das Quecksilber im offenen Schenkel 28 Zoll höher, als im geschlossenen. Die abgesperrte Luft befindet sich also unter einem Druck von zwei Atmosphären, dem natürlichen Atmosphärendruck und dem Druck der Quecksilbersäule, der ebenso groß wie der Luftdruck ist. So fuhr Boyle fort und fand als zusammengehörige Werte von Volumen und Druck die folgenden:

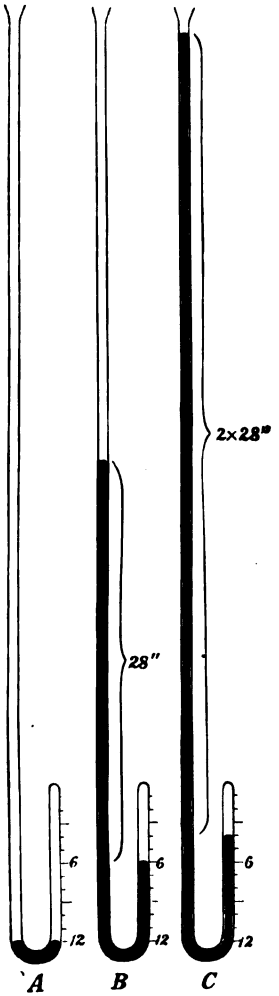
Volumen . . .	12	6	4	3
Druck	1	2	3	4 Atm.

Das Volumen einer Luftmasse wird in demselben Verhältnis kleiner, in dem der Druck größer wird. Ein 2-, 3-, 4-, 12mal so

Digitized by Google

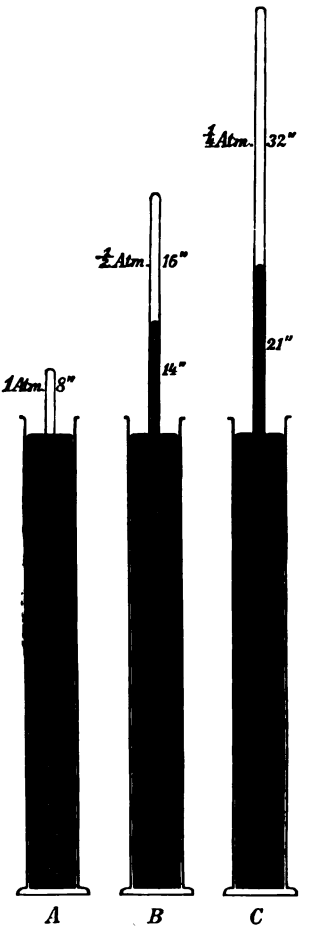
großer Druck bewirkt eine Verminderung des Volumens auf $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$, $^1/_{12}$. Man kann auch ſagen, daß das Produkt aus Volumen und Druck für eine gewiſſe Menge Luft immer dasſelbe iſt, $12 \times 1 = 6 \times 2 = 4 \times 3 = 3 \times 4$,

Fig. 256.



Boyleſches Geſetz (Zuſammendrückung).

Fig. 257.



Boyleſches Geſetz (Ausdehnung).

allerdings nur unter der Vorausſetzung, daß ſich die Temperatur der Luft nicht ändert.

Boyle unterſuchte dann weiter, ob das Geſetz auch gilt, wenn man den Druck, unter dem ſich die Luft befindet, vermindert. Er füllte ein an dem einen Ende geſchloſſenes Rohr mit Queckſilber, aber ſo, daß noch etwas Luft in demſelben blieb, hielt die Öffnung des Rohres mit dem Finger zu und

Digitized by Google

ſenkte es in ein hohes Queckſilbergefäß ſo tief ein (Fig. 257, *A*, a. v. S.), daß gerade der aus dem Queckſilber hervorragende Teil des Rohres mit Luft gefüllt war. Wir wollen annehmen, dieſer Teil ſei 8 Zoll lang geweſen. Die Luft befindet ſich dann unter dem Druck einer Atmoſphäre. Wird nun das Rohr in die Höhe gezogen, ſo dehnt ſich die Luft aus, aber das Queckſilber ſteigt zugleich in dem Rohr etwas. Wenn das Rohr ſo hoch gehoben wird, daß ſich die Luft auf das Doppelte des urſprünglichen Volumens ausdehnt (*B*), ſo iſt die Queckſilberſäule 14 Zoll lang. Der Druck der Atmoſphäre auf das äußere Queckſilber, der gleich dem Druck einer Queckſilberſäule von 28 Zoll Höhe iſt, iſt alſo auf einen halben Atmoſphärendruck vermindert. Wird das Rohr ſo hoch gehoben, daß das Volumen der Luft gleich dem vierfachen des urſprünglichen Volumens wird (*C*), ſo ſteigt das Queckſilber auf 21 Zoll. Die Luft befindet ſich dann nur noch unter dem Druck einer Queckſilberſäule von $28 - 21 = 7$ Zoll, d. h. unter $^1/_4$ Atmoſphärendruck.

§ 258. Hiermit iſt bewieſen, daß das Geſetz allgemein gültig iſt, und es iſt nun kein Grund mehr vorhanden, von einem „natürlichen“ Raum der Luft zu ſprechen, wie es Heron getan hatte. Was Heron das natürliche Volumen der Luft nannte, iſt das Volumen, welches ſie unter dem Druck einer Atmoſphäre einnimmt, d. h. unter dem Druck, den die Luft auf die Erdoberfläche oder, beſſer geſagt, auf die Meeresoberfläche ausübt.

§ 259. Dies von Boyle aufgefundene Geſetz wurde früher allgemein, wie auch jetzt noch bisweilen, das Mariotteſche Geſetz genannt. Es iſt ſpäter von verſchiedenen Phyſikern von neuem unterſucht worden, und es hat ſich herausgeſtellt, daß das Geſetz doch nicht ſo einfach iſt, wie es nach den Verſuchen von Boyle den Anſchein hatte. Eine ganze Reihe der geſchickteſten Experimentatoren, meiſt Franzoſen, haben ſich mit dem Boyleſchen Geſetz beſchäftigt.

Die erſten Abweichungen, welche man bemerkte, führte man auf Beobachtungsfehler zurück. Dann bemerkte man aber, daß es einige Luftarten gab, die ganz beſtimmt ein abweichendes Verhalten zeigten. Sie wurden ſtärker zuſammengedrückt, als es das Geſetz erforderte. Da die betreffenden Gaſe aber ſolche waren, die durch ſtarke Zuſammendrückung und durch Abkühlung in Flüſſigkeiten verwandelt werden können, meinte man, daß ſie keine echten Luftarten ſeien. Aber für die echten mußte das Geſetz gelten. Ja man betrachtete das Geſetz als eine Art Vernunftgeſetz, d. h. man hielt es für eine logiſche Notwendigkeit, daß Luft von der doppelten Dichtigkeit den doppelten Druck ausüben müſſe. Hervorragende Phyſiker hielten trotz der Abweichungen, die ſie ſelbſt fanden, an dem Geſetze feſt und erklärten die Abweichungen durch Fehler in ihren eigenen Meſſungen.

Schließlich ſtellte aber der franzöſiſche Phyſiker Regnault (1810 bis 1878) durch genaue Meſſungen unwiderleglich feſt, daß das Geſetz für keine einzige Luftart abſolut richtig iſt. Sie ſind alle bis auf den Waſſerſtoff ſtärker zuſammendrückbar, als das Geſetz es erfordert, und man hätte ſie vielleicht ſämtlich für Dämpfe erklärt mit Ausnahme des Waſſerſtoffs, der allein eine

Digitized by Google

echte Luftart gewesen wäre, wenn nicht Regnault schließlich nachgewiesen hätte, daß der Wasserstoff in der entgegengesetzten Richtung abweicht, indem er weniger zusammendrückbar ist, als es das Boylesche Gesetz erfordert. Es gibt also überhaupt keine Luftart, welche das vermeintliche Vernunftgesetz befolgt. Aber die Geschichte des Boyleschen Gesetzes zeigt, daß man nicht voreilig sein soll, Naturgesetze für logische Notwendigkeiten zu erklären, also für etwas, was man durch bloßes Denken begründen oder aus einer mathematischen Formel ableiten kann. Die Natur selbst muß uns die Naturgesetze lehren, und wir haben nichts anderes zu tun, als unsere Formeln den wirklichen Gesetzen so gut wie möglich anzupassen. Für die Zwecke des praktischen Lebens gibt übrigens das Boylesche Gesetz die Zusammendrückbarkeit der Luftarten hinreichend genau an.

§ 260. Edme Mariotte war um 1620 in Bourgogne im Departement Saône et Loire geboren. Er war zuerst Prior in einem Kloster in der Nähe von Dijon, allein nachdem er durch seine naturwissenschaftlichen Forschungen bekannt geworden war, wurde er 1666 als Mitglied der Akademie der Wissenschaften nach Paris berufen, und hier blieb er bis zu seinem Tode 1684. Er konnte sich nun ungestörter dem Studium widmen, und er hat zahlreiche wertvolle Arbeiten geliefert. Ohne die erwähnte Arbeit Boyles zu kennen[1]), gab er 1676 ein schönes Werk über die Eigenschaften der Luft heraus, in dem er dasselbe Gesetz über die Zusammendrückbarkeit der Luft aufstellte, welches Boyle einige Jahre früher aufgestellt und durch ähnliche Versuche begründet hatte. Zugleich nahm er das Problem der barometrischen Höhenmessung in Angriff, mit dem sich bereits Pascal beschäftigt hatte, ohne eine erschöpfende Lösung desselben zu geben.

§ 261. Aus dem von Pascals Schwager Perrier ausgeführten Versuch hatte sich ergeben, daß der Luftdruck auf dem Gipfel eines Berges geringer ist als am Fuße desselben, und Pascal hatte darauf hingewiesen, daß man diese Erscheinung dazu benutzen könne, um die Höhe eines Ortes zu bestimmen. Der Gedanke war von verschiedenen anderen aufgenommen worden, allein sie hatten den genaueren Zusammenhang zwischen der Zunahme der Höhe und der Abnahme des Druckes nicht erkannt.

Mariotte beobachtete im Pariser Observatorium den Barometerstand teils in einem tiefen Keller, teils zu ebener Erde und teils auf der Spitze des Observatoriums und berechnete nach diesen Beobachtungen den Luftdruck in größeren Höhen. Es ist interessant, den nüchternen Berechnungen Mariottes auf diesem Gebiete zu folgen, auf dem früher nicht viel gerechnet worden war, und das einer mathematischen Behandlung schwer zugänglich zu

---

[1]) Diese Annahme ist wahrscheinlich falsch. Als Mariotte seinen 1679 erschienenen „Essai sur la nature de l'air", in welchem das fragliche Gesetz enthalten ist, abfaßte, war er höchst wahrscheinlich mit dem Boyleschen Werke über diesen Gegenstand (New experiments touching the spring of the air), das bereits 1660 erschienen war, bekannt. Vergl. Tait, Die Eigenschaften der Materie, deutsch von Siebert (Wien 1888), S. 310. Anm. d. Übers.

Digitized by Google

sein schien. Wir geben daher die Berechnung Mariottes hier wieder, aber nicht mit den Originalzahlen, sondern in ein Maß umgerechnet, welches heute gebräuchlicher ist.

Die Verschiedenheit der Barometerstände in verschiedener Höhe ließ sich sehr leicht in einem so hohen Gebäude wie das Pariser Observatorium messen, ja sie läßt sich noch bei viel geringeren Höhenunterschieden beobachten. Das Barometer fällt nämlich um 1 mm, wenn man sich nur um 10,5 m erhebt. Nun muß man sich selbstverständlich den Luftdruck ganz gleichmäßig abnehmend denken, ebenso die Dichtigkeit der Luft. Wir wollen uns aber mit Mariotte vorstellen, die Luft bestehe aus einzelnen dünnen Schichten und jede Schicht besitze gleichförmige Dichtigkeit. Ferner wollen wir uns vorstellen, in der untersten Schicht sei der Luftdruck überall 760 mm, in der nächsten überall 759 mm, in der folgenden 758 mm, u. s. w. Dann können wir berechnen, wie dick (hoch) jede dieser Schichten ist. Vergleicht man nämlich die erste Schicht mit der zweiten, so findet man, daß die zweite Schicht, indem sie nur einen Druck von 759 mm ausübt, einen größeren Raum einnehmen muß, als die erste, und zwar muß dieser Raum nach dem Mariotteschen Gesetz $\frac{760}{759}$ mal so groß sein, als der von der ersten Schicht eingenommene Raum. Also muß die Dicke dieser Schicht $\frac{760}{759} \cdot 10{,}5$ m sein. Die dritte Schicht hat einen Druck von 758 mm. Also muß sie $\frac{760}{758}$ mal so dick wie die erste sein. Die Dicke der aufeinander folgenden Schichten ist demnach

$$10{,}5, \quad \frac{760}{759} \cdot 10{,}5, \quad \frac{760}{758} \cdot 10{,}5, \quad \frac{760}{757} \cdot 10{,}5 \cdots$$

Will man nun die Höhe einer Stelle mit gegebenem Luftdruck, z. B. die Höhe der Stelle berechnen, wo der Luftdruck gleich $^1/_2$ Atmosphärendruck (380 mm) ist, so muß man die Dicke von 380 Schichten berechnen und addieren. Dies ist natürlich eine sehr umständliche Rechnung. Mariotte führte sie in der folgenden abgekürzten, aber nicht ganz genauen Weise aus. Die unterste Schicht ist 10,5 m dick. Die oberste Schicht mit dem Luftdruck 380 mm hat die Dicke $\frac{760}{380} \cdot 10{,}5$ oder $2 \cdot 10{,}5$ m.

Die oberste und die unterste Schicht haben also im Durchschnitt eine Dicke von 15,75 m. Dasselbe gilt von der zweiten Schicht von oben und der zweiten von unten, da die erstere etwas weniger dick ist als die oberste, die letztere dagegen etwas dicker als die unterste. Auch die dritte Schicht von oben und die dritte von unten, die vierte von oben und die vierte von unten haben eine durchschnittliche Dicke von 15,75 m. Da also die Dicke für alle Schichten im Durchschnitt 15,75 ist, so ist die Höhe aller Schichten zusammen $15{,}75 \times 380 = 5985$ m.

Digitized by Google

§ 262. Der Gedankengang war hiermit gegeben, aber das Rechnungsverfahren konnte noch verbessert werden, und dies geschah 1762 durch Deluc in Genf. Die Rechnung wird einfacher, wenn man nicht die Dicke der Luftschicht für jedes Millimeter Luftdruck, sondern umgekehrt den Luftdruck für jede Luftschicht von 1 m Höhe berechnet.

So findet man, wenn man den Luftdruck am Meeresspiegel als Atmosphärendruck bezeichnet, daß der Luftdruck beträgt:

$^1/_2$	Atmosphäre	in	5539 m	Höhe
$^1/_4$	„	„	11078 „	„
$^1/_8$	„	„	16617 „	„
$^1/_{16}$	„	„	22156 „	„

Da man während einer Bergbesteigung oder während einer Ballonfahrt in der Regel nicht wissen kann, wie groß der Luftdruck gleichzeitig am Meeresspiegel ist, so kann man auch nicht bestimmt wissen, in welcher Höhe man sich befindet. Wenn man aber nachträglich ermitteln kann, wie groß der Luftdruck an derjenigen Stelle gewesen ist, über der man sich befunden hat, so kann man auch ziemlich genau berechnen, in welcher Höhe man sich befunden hat. — Es muß jedoch auf die Temperatur der Luft Rücksicht genommen werden. Man begnügt sich in der Regel damit, die Temperatur oben zu messen und gleichzeitig unten messen zu lassen. Durch unregelmäßige Verteilung der Wärme in den zwischenliegenden Schichten wird die Genauigkeit des Resultates der Rechnung beeinträchtigt.

§ 263. Die von Aristoteles (§ 228), Galilei (§ 229) und Guericke (§ 250) ausgeführten Versuche, das Gewicht der Luft zu ermitteln, müssen sämtlich als mißlungen bezeichnet werden. Auch Boyle machte einen solchen Versuch, und zwar suchte er, wie Galilei, die Luft durch Wärme aus einem Behälter auszutreiben. Dies erreichte er natürlich nicht vollständig, und er fand daher den Unterschied der Gewichte des mit Luft gefüllten und des als luftleer angesehenen Behälters zu klein. Er fand deshalb für das spezifische Gewicht der Luft einen zu kleinen Wert, nämlich $^1/_{938}$.

Genauer läßt sich das Gewicht der Luft aus Mariottes Messung des Luftdruckes in verschiedenen Höhen ableiten. Eine Luftschicht oder eine Luftsäule von 10,5 m Höhe wiegt ebensoviel wie eine Quecksilberschicht oder Quecksilbersäule von 1 mm Höhe. Jene ist das 10500fache von dieser, also ist das Quecksilber 10500mal so schwer wie die Luft. Da das Quecksilber 13,6mal so schwer wie Wasser ist, ist das Wasser $\frac{10500}{13{,}6}$ oder 772mal so schwer wie Luft, und zwar wie Luft von 0° unter einem Atmosphärendruck (760 mm). Bei einem anderen Druck und ebenso bei einer anderen Temperatur hat die Luft eine andere Dichtigkeit, folglich ein anderes (spezifisches) Gewicht.

Beispiel 1. Wieviel Gramm wiegt ein Kubikcentimeter, ein Liter und ein Kubikmeter Luft von 0° und 760 mm?

Digitized by Google

Beispiel 2. Man berechne das Gewicht der Luft des Zimmers, in dem man sich befindet.

§ 264. Dem Namen Mariottes begegnet man übrigens auch auf vielen anderen Gebieten der Physik. Wir trafen ihn bereits in der Lichtlehre (der blinde Punkt, § 111), und wir werden ihn auch in der Wärmelehre und namentlich in der Meteorologie treffen. In mehreren anderen Richtungen besteht seine Tätigkeit mehr in einer Fortsetzung und Ergänzung von Untersuchungen, die von anderen begonnen worden waren. So setzte er die Untersuchungen von Wallis, Wren und Huygens über den Stoß fort. Der Mariottesche Stoßapparat findet sich heute in jedem physikalischen Kabinett. Ebenso setzte er die Untersuchungen Castellis (§ 232) und anderer über die Bewegung des Wassers und Torricellis Studien über das Ausströmen des Wassers fort (§ 237). Die „Mariottesche Flasche" benutzt man oft, wenn es sich darum handelt, das Wasser aus einer Öffnung mit gleichförmiger Geschwindigkeit ausströmen zu lassen. Die Flasche (Fig. 258) besitzt unten eine seitliche Ausflußöffnung, und in den Hals der Flasche ist vermittelst eines durchbohrten Stopfens ein Glasrohr eingesetzt, welches mehr oder weniger tief in die Flasche geschoben werden kann. Während das Wasser ausläuft, dringt durch das Rohr Luft ein, die in Blasen durch das Wasser aufsteigt. Solange Wasser ausläuft, ist der Druck am unteren Ende des Glasrohres und folglich auch in der ganzen horizontalen Ebene, in der sich das Ende befindet, gleich einer Atmosphäre. Der Druck, welcher das Wasser aus dem Ausflußrohr heraustreibt, ist also durch die Höhe dieser Ebene über der Ausflußöffnung bestimmt. Er bleibt also unverändert, solange sich das untere Ende des Rohres im Wasser befindet. Die Ausflußgeschwindigkeit des Wassers läßt sich leicht durch Verschieben des Rohres regulieren. Kommt das Ende des Rohres auf die Höhe der Ausflußöffnung, so hört natürlich das Ausfließen des Wassers auf.

Fig. 258.

Mariottesche Flasche.

§ 265. Die Verdichtungspumpe (Kompressionspumpe), mit der die Luft

Digitized by Google

zusammengedrückt werden kann, bezeichnet nicht wie die Verdünnungspumpe einen Wendepunkt in der Geschichte der Naturforschung. Und doch ist die Verdichtungspumpe viel älter, wenn man nicht an eine moderne Form denkt, die gerade so konstruiert sein kann wie eine Verdünnungspumpe, nur mit dem Unterschiede, daß sich die Ventile nach der entgegengesetzten Seite öffnen, so daß sich der Zylinder mit Luft füllt, wenn der Kolben in die Höhe gezogen wird, während er beim Herabdrücken des Kolbens die Luft an den Behälter abgibt, in dem die Verdichtung stattfinden soll.

Bereits die Feuerspritze war gewissermaßen eine Kompressionspumpe, insofern die Luft im Windkessel durch das Wasser zusammengedrückt wird. Ktesibios hat offenbar eine Art Kompressionspumpe gehabt, mit der er die Luft in seiner Windbüchse zusammendrückte, ja eine einfache Knallbüchse ist eine Art Verdichtungspumpe. Das vordere Ende des Rohres (Fig. 259) ist durch eine Wergkugel luftdicht verschlossen, und eine ebensolche Kugel wird

Fig. 259.

Knallbüchse.

durch den „Ladestock" in das Rohr hineingetrieben. Wenn die Luft im Rohre hinreichend zusammengedrückt ist, fliegt die vordere Kugel mit einem Knall heraus.

§ 266. Verdünnungspumpen und Verdichtungspumpen finden vielfache Anwendungen, die wir zum Teil später kennen lernen werden. Hier mögen die folgenden Beispiele genannt werden.

Man braucht gewisse Luftarten oft in größerer Menge, wünscht sie aber im zusammengedrückten Zustande zu haben, damit sie nicht zu viel Raum einnehmen. Man drückt sie daher vermittelst einer Verdichtungspumpe in Stahlflaschen zusammen.

Zusammengedrückte Luft besitzt natürlich ein gewisses Arbeitsvermögen, welches zur Bewegung einer Maschine benutzt werden kann. Man hat derartige Maschinen beim Bohren von Tunneln benutzt. In langen Tunneln kann man zum Betriebe der Bohrmaschinen keine Dampfmaschinen benutzen, da diese die Luft im Tunnel zum Atmen untauglich machen würden. Durch eine Maschine, die durch zusammengedrückte Luft bewegt wird, wird dagegen der Arbeitsstelle im Tunnel fortwährend frische Luft zugeführt. Die Zusammendrückung der Luft geschieht vor dem Tunnel durch Pumpen, die in der Regel durch Wasser in Bewegung gesetzt werden, und die zusammengedrückte Luft wird durch ein Rohr nach der Arbeitsstelle geleitet.

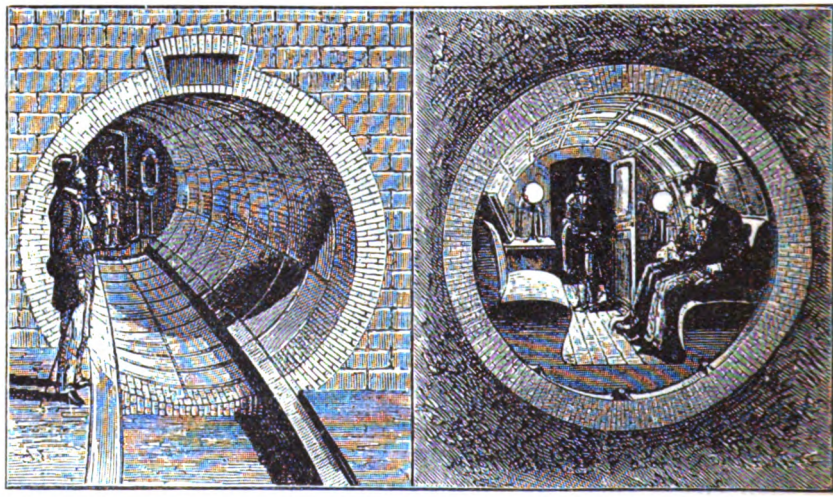
In der neueren Zeit hat man angefangen, in ähnlicher Weise große Städte mit Triebkraft zu versehen. Außerhalb der Stadt werden große Kessel durch Luftpumpen, die durch Dampfmaschinen getrieben werden, mit zusammengedrückter Luft gefüllt. Diese wird durch Röhren in die Stadt

Digitized by Google

geleitet, wo sie von den Konsumenten zum Betriebe kleiner Maschinen benutzt wird. Dieses System hat, abgesehen von der Reinlichkeit, den Vorzug, daß eine einzige große Dampfmaschine billiger arbeitet, als viele kleine.

Noch früher, ja bereits vom Beginne des 19. Jahrhunderts an, hat sich in einigen Großstädten eine eigentümliche Art der Postbeförderung, die sogenannte Rohrpost, entwickelt. Durch lange eiserne Röhren wird eine Art Pfropfen mit Kapsel und Inhalt von Briefen von einer Station zur anderen geblasen, wo eine Luke im Rohr geöffnet und die Post expediert wird. Die Beförderung eines „Zuges" geschieht entweder durch Aussaugen der Luft vor

Fig. 260.



Atmosphärische Eisenbahn in Newyork (1870).

dem Zug oder durch Einpressen von verdichteter Luft hinter dem Zug. Man hat diese Art des Betriebes an einigen Orten auch zur Beförderung von Personen benutzt, die in einem nicht sehr geräumigen zylindrischen Wagen sitzen, der das große Rohr annähernd ausfüllt (Fig. 260). Diese Art der Beförderung hat jedoch keine große praktische Bedeutung.

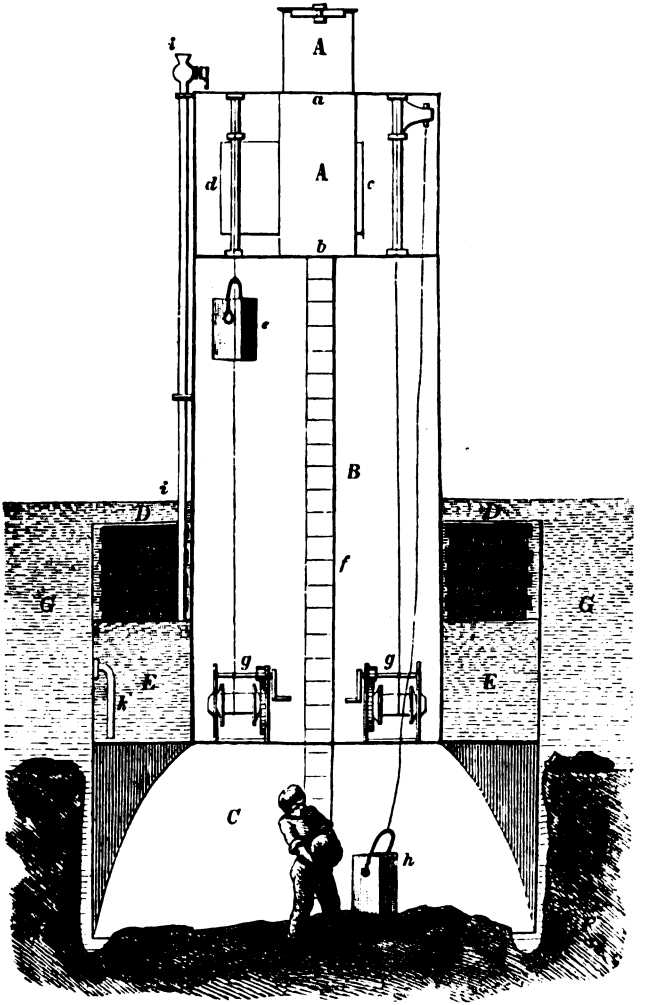
§ 267. Von größerer Bedeutung ist die Luftverdichtung für die Taucherglocke.

Heron machte darauf aufmerksam (§ 209), daß das Innere eines Gefäßes trocken bleibt, wenn man es mit der Mündung nach unten in Wasser eintaucht. Die Luft im Gefäß hindert das Wasser einzudringen. Diese Tatsache war damals schon lange bekannt gewesen. Bereits Aristoteles erwähnt, daß man sich lange unter Wasser aufhalten kann, wenn man einen Kessel über den Kopf stülpt. Praktische Anwendung fand die Tatsache jedoch erst viel später. Es handelte sich wohl nur um die Vorführung eines Kuriosums, als 1538 zwei Griechen in Gegenwart Kaiser Karls V. und einer zahlreichen

Digitized by Google

Menschenmenge in Toledo mit einem über den Kopf gestülpten großen Kessel und mit einem brennenden Licht in das Wasser stiegen, sich längere Zeit unter demselben aufhielten und dann mit dem brennenden Licht und mit trockenen Kleidern wieder zum Vorschein kamen. Erst im Jahre 1588, als

Fig. 261.



Taucherglocke beim Brückenbau.

ein Teil der spanischen „unüberwindlichen Flotte" an der Westküste von Schottland untergegangen war, wurden, wie es scheint, Taucherglocken beim Heben gesunkener Schätze verwendet.

Später hat man der Taucherglocke je nach den Umständen, unter denen

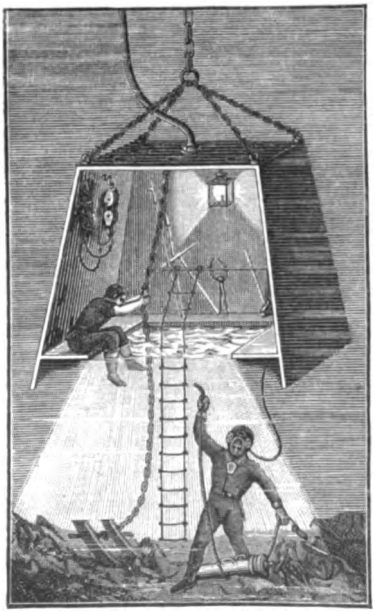
Digitized by Google

sie benutzt werden sollte, verschiedene Formen gegeben. Besonders die Engländer Robert Hooke und Edmund Halley haben sich um die Konstruktion der Taucherglocke und die Lufterneuerung in derselben verdient gemacht. Bei der letzteren findet die Kompressionspumpe eine ihrer wichtigsten Anwendungen.

Die Taucherglocke hat sich namentlich in zwei verschiedenen Richtungen entwickelt, einmal als großer Apparat, in dem gleichzeitig mehrere Personen auf dem Boden des Wassers arbeiten können, und dann als Taucheranzug, in dem sich eine einzelne Person bewegen kann.

Fig. 261 (a. v. S) zeigt den Durchschnitt durch eine Taucherglocke, die 1868 beim Umbau einer Brücke (Knippelsbro) in Kopenhagen verwendet wurde. Das Ganze ist ein unten offener großer eiserner Kasten, in den vermittelst einer Dampfmaschine durch ein Rohr Luft eingepreßt wird. Die Luft treibt das Wasser bis an den Rand der Glocke herab, und da mit dem Pumpen fortgefahren wird, so tritt die Luft unten aus und steigt in Blasen durch das Wasser in die Höhe. Will man sich in die Glocke begeben, so steigt man zunächst durch die Luke *a* in den Vorraum *A*. Die Luke wird luftdicht geschlossen und ein Hahn geöffnet, durch den die komprimierte Luft aus *B* einströmt. Wenn die Luft in dem Raum *A* dieselbe Dichtigkeit wie in *B* angenommen hat, kann man die Luke *b* öffnen und in die große Glocke hinabsteigen. Ebenso steigt man beim Verlassen der Glocke zunächst aus dem Raum *B* in den Raum *A*, öffnet in diesem einen Hahn, durch den die Luft ausströmt, und erst nachdem die Luft in *A* die Dichtigkeit der äußeren Luft angenommen hat, verläßt man den Raum *A*. Abgesehen von dem etwas umständlichen Hinabsteigen und Hinaufsteigen kann man auf dem Boden der Glocke eine Arbeit ebenso leicht wie auf dem trockenen Erdboden ausführen.

Fig. 262.



Taucher auf dem Meeresgrund.

Der Taucheranzug (Fig. 262) besteht aus einem Guttaperchasack, dessen Form der Gestalt des menschlichen Körpers (ohne Kopf) entspricht. Derselbe hat oben eine große Öffnung, durch die der Taucher in den Sack hineingleitet. Die Hosenbeine sind unten vollständig geschlossen, die Ärmel dagegen haben eine Öffnung für die Hände. Damit hier kein Wasser eindringen kann, müssen die Ärmel am Handgelenk fest schließen. Der Verschluß wird

Digitized by Google

durch Anlegen eines Guttapercharinges als Armband noch mehr gesichert. Der Sack wird am Hals zusammengeschnürt, aber nicht luftdicht, da der Kragen in den Metallhelm kommt, den man dann auf den Kopf setzt. Der Helm breitet sich über die Schultern sowie den oberen Teil der Brust und des Rückens aus. Er ist mit einem oder mehreren Augengläsern versehen und steht mit einem starkwandigen Gummischlauch in Verbindung, durch den von oben (Schiffsdeck) ununterbrochen frische Luft eingepumpt wird. Die verbrauchte Luft tritt unten am Helm aus. — Da der Auftrieb des Wassers den Taucher seines ganzen Gewichtes beraubt, so würde er nicht sehr fest auf dem Boden stehen. Man erhöht daher sein Gewicht dadurch, daß man an den Sohlen sowie auf der Brust und dem Rücken Bleiplatten befestigt.

Mit einem solchen Anzug bekleidet kann ein Taucher, der ein kräftiger Mann sein muß, bis auf 30 und mehr Meter, aber kaum bis 45 Meter hinabsteigen und auf dem Meeresboden wichtige Arbeiten verrichten, wertvolle Gegenstände von gesunkenen Schiffen bergen, eine vorläufige Dichtung eines Lecks ausführen, das ein Schiff zum Sinken gebracht hat, an dem mit Wasser gefüllten Schiffsraum einen Gummischlauch anbringen, durch den nachher vermittelst einer Druckpumpe Luft in das Schiff eingeblasen wird, um das Schiff zum Steigen zu bringen.

§ 268. Daß es dem Menschen einmal gelingen würde zu fliegen, ist wohl seit den ältesten Zeiten als etwas durchaus nicht Unwahrscheinliches angesehen worden. Warum sollte der Mensch, dem das Flugvermögen nicht von der Natur verliehen ist, nicht durch Kunst erreichen, was die Tiere können? Die Entdeckung, daß die Luft ein Meer ist und daß dieses Meer auf jeden Körper einen Auftrieb ausübt, der um so größer ist, je größer der Körper ist (§ 250), hatte zur Folge, daß der Gedanke an die Möglichkeit des Fliegens oder, besser gesagt, des Schwimmens im Luftmeer, bestimmte Gestalt annahm. Der Jesuit Francesco Lana in Brescia (1631—1687) machte den Vorschlag, man sollte vier große kupferne Kugeln von 20 Fuß Durchmesser und $^1/_{23}$ Linie Wandstärke anfertigen und luftleer machen. Wenn man einerseits das Gewicht des erforderlichen Kupfers und anderseits den Auftrieb berechnet, der auf eine Kugel von solcher Größe wirkt, so findet man, daß jenes viel größer als dieser ist. Die Wände müßten also viel dünner sein, wenn die Kugeln für sich allein in der Luft in die Höhe steigen sollten, und noch viel dünner, wenn sie gleichzeitig noch etwas tragen sollten. Aber schon die von Lana vorgeschlagene Wandstärke würde den ungeheueren Druck nicht aushalten, den das Luftmeer auf die luftleere Kugel ausüben würde. Die Kugel würde zusammengedrückt werden.

Nachdem der Wasserstoff entdeckt worden war, dessen spezifisches Gewicht in Beziehung auf Luft ungefähr nur $^1/_{15}$ ist, lag der Gedanke nahe, eine große Kugel mit Wasserstoff zu füllen. Eine solche Kugel brauchte eine viel geringere Wandstärke zu haben, als eine luftleere Kugel. Es fehlte auch nicht an Versuchen, eine mit Wasserstoff gefüllte Kugel zum Steigen zu bringen, allein keiner von diesen Versuchen glückte, teils weil die Stoffe, aus

Digitized by Google

denen die Hülle bestand, nicht dicht, teils weil sie zu schwer waren. Nur ein Versuch von Cavallo (geb. 1749 in Neapel, gest. 1809 in London), mit Wasserstoff gefüllte Seifenblasen steigen zu lassen, gelang.

Schließlich gelang es zwei Franzosen, den Gebrüdern Joseph und Jacques Montgolfier, man kann fast sagen durch einen Zufall, den Luftballon zu erfinden. Sie waren Fabrikanten in Vidalon-lès-Annonay in den Cevennen (Dep. Ardèche). Hier hatten sie beobachtet, wie die Wolken an den Bergwänden emporsteigen und sich über die Gipfel erheben konnten. Sie versuchten daher eine Wolke in einen großen Sack einzuschließen, indem sie den Dampf aus einem Kessel in denselben aufsteigen ließen, allein der Sack wurde naß und fiel zusammen. Als sie später mit einem Buche Prieſtleys über die Luftarten bekannt wurden, machten sie Versuche mit Wasserstoff, aber auch ohne Erfolg. Endlich glaubten sie eine besondere Luftart (Gaz de Montgolfier) zu erzeugen, indem sie feuchtes Stroh entzündeten. Als sie diese Luft, von der sie annahmen, daß sie ein geringes spezifisches Gewicht habe, in einen großen Papiersack eintreten ließen, stieg der Sack in die Höhe.

Ein größerer Versuch, den die Gebrüder Montgolfier in Annonay am 4. Juni 1783 mit einem Leinwandballon vornahmen, der einen Durchmesser von 38 Fuß hatte und der in wenigen Minuten eine Höhe von 1500 Fuß erreichte, erregte großes Aufsehen. Als die Kunde von diesem Versuch nach Paris gedrungen war, sammelte man hier sofort das nötige Geld, um den Versuch zu wiederholen. Die Ausführung desselben wurde Jacques Charles übertragen. Charles war 1746 geboren, hatte sich in schönen Künsten und in Mechanik ausgebildet, experimentierte viel mit Elektrizität und hielt vorzügliche Vorlesungen über diese neue Wissenschaft. Da er über die von den Gebrüdern Montgolfier benutzte Luftart nichts anderes in Erfahrung bringen konnte, als daß sie halb so schwer wie atmosphärische Luft war, beschloß er, Wasserstoff zu benutzen. Ein Ballon von 12 Fuß Durchmesser wurde angefertigt und mit Wasserstoff gefüllt, dessen Darstellung in einer so großen Menge damals eine umständliche Operation war. Am 27. August des genannten Jahres wurde der gefüllte Ballon losgelassen, und er erhob sich schnell in die Luft. Die Pariser Bevölkerung verfolgte das Schauspiel mit außergewöhnlichem Interesse.

Hiermit waren die beiden Arten von Luftballons in dem kurzen Zeitraum eines Vierteljahres erfunden, die „Montgolfiere", die mit warmer atmosphärischer Luft gefüllt wird, und die „Charliere", die mit Wasserstoff oder mit Leuchtgas gefüllt wird. Das letztere ist leichter zu beschaffen, ist ungefähr halb so schwer wie Luft und ungefähr gerade so schwer wie die warme Luft, mit der die Montgolfieren gefüllt werden.

§ 269. Bereits in demselben Jahre stiegen Personen mit dem Luftballon auf, und zwar sowohl mit der Montgolfiere, als auch mit der Charliere. Zur Aufnahme der Personen diente eine am Ballon aufgehängte Gondel. Am 21. November stieg der Chemiker Pilatre de Rozier und

Digitized by Google

Marquis d'Arlandes mit einer Montgolfiere (Fig. 263), am 3. Dezember Charles selbst und sein Werkführer Robert mit einer Charliere (Fig. 264) auf. Diese Fahrten verliefen ohne Unfall, aber bei fortgesetzten Versuchen hatte Rozier 1785 das Unglück, daß sein Ballon in einer Höhe von ungefähr 600 Metern über der Erde in Brand geriet, und er kam nebst seinem Begleiter, dem Physiker Romain, natürlich durch den Sturz um. Auch Charles unternahm in den folgenden Jahren mehrere Ballonfahrten, und zwar mit glücklichem Ausgang. Er starb 1823.

Fig. 263.

Montgolfiere.

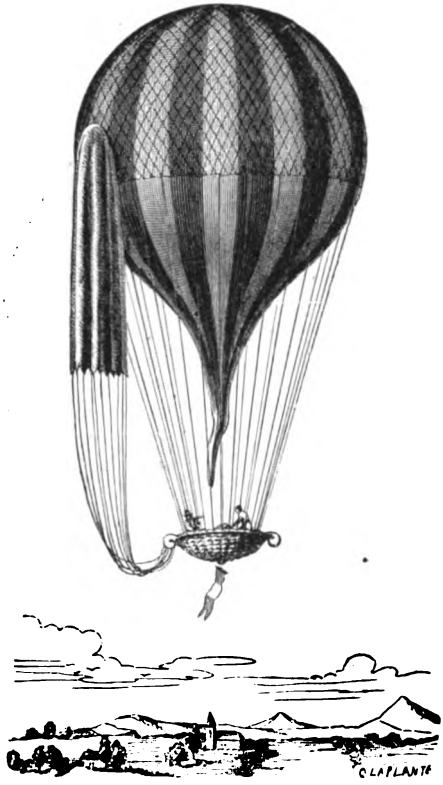
Das Schicksal Roziers mußte eine Warnung sein, die Montgolfiere zur Beförderung von Personen zu benutzen. Sie hat allerdings vor der Charliere den Vorzug, daß man sie nach Belieben zum Steigen oder Sinken bringen kann, indem man unter der großen Öffnung, die der Ballon unten hat, mehr oder weniger stark feuert, aber die Feuersgefahr ist zu groß. Bei dem Aufsteigen mit der Charliere hat man kein anderes Mittel, den Ballon zum Steigen zu bringen, als das Ausleeren mitgenommener Sandsäcke. Soll der Ballon sinken, so muß man durch Öffnen eines Ventils einen Teil des Gases entweichen lassen. Beide Operationen können aber mit Rücksicht auf den beschränkten Vorrat von Sand und Gas nicht beliebig oft wiederholt werden.

§ 270. Der größte Mangel der Luftschiffahrt besteht darin, daß der Ballon nicht gesteuert werden kann, sondern daß er der Luftströmung (dem Wind) folgen muß. Dazu kommt noch der Umstand, daß das Landen nicht selten mit Gefahr verbunden ist. In der letzteren Hinsicht ist es schon etwas Mißliches, daß man es selbst nur in geringem Grade in der Gewalt hat, die Landungsstelle zu bestimmen. Sodann ist die Geschwindigkeit, wenn man sich der Erde nähert, in der Regel sehr groß. Schon ein „frischer" Wind hat eine Geschwindigkeit von drei Meilen in der Stunde, und der Ballon hat dieselbe Geschwindigkeit wie der Wind. Daher empfinden die Reisenden den stärksten Sturm als Windstille.

Digitized by Google

Was die Steuerung betrifft, so ist selbstverständlich eine große Menge von Versuchen gemacht worden. Es würde an und für sich nicht schwierig sein, Vorrichtungen anzubringen, die den Ballon in jeder beliebigen Richtung forttreiben können, wenn wir nur über eine Triebkraft verfügten, die dem Ballon eine hinreichend große Geschwindigkeit erteilen könnte. Eine solche ist aber schwer zu beschaffen, ohne den Ballon mit einer schweren Maschine zu belasten. Die Bestrebungen sind daher vorzugsweise darauf gerichtet gewesen, eine möglichst leichte, dabei aber kräftige Bewegungsmaschine zu konstruieren. Bis jetzt ist man aber noch nicht weiter gekommen, als daß man sich gegen schwachen Wind halten oder demselben entgegenarbeiten kann.

Fig. 264.



Charliere.

Da die Kraft, mit der ein Ballon gegen den Wind getrieben werden soll, infolge der bedeutenden Größe des Ballons eine unverhältnismäßig große sein muß, hat man in neuerer Zeit das Problem von einer ganz anderen Seite her in Angriff genommen. Man fängt an, das auf den Auftrieb begründete Schwimmerprinzip aufzugeben und den Vogelflug nachzuahmen, bei dem der Widerstand der Luft gegen die Flügelflächen zur Geltung kommt. Dieser kann aber, wie es scheint, namentlich bei großer Geschwindigkeit mit Vorteil benutzt werden.

Der Luftballon ist, seit man ihn kennt, nicht nur für Vergnügungszwecke verwendet worden, sondern er hat auch in manchen Kriegen praktische Verwendung gefunden und namentlich auch bei Fahrten zu wissenschaftlichen Zwecken gute Dienste geleistet. Wo es sich um bedeutende Höhen handelt, kann jedenfalls ein mechanischer Flugapparat nicht mit dem Luftballon in Wettbewerb treten. Die größte Höhe, 10000 Meter, wurde 1862 von den Engländern Glaisher und Coxwell erreicht. Der Luftdruck in dieser Höhe war ungefähr $^1/_4$ Atmosphäre (§ 262).

Digitized by Google

Das Weltgebäude.

Erkenntnisse und Entdeckungen nach 1630.

Digitized by Google

Digitized by Google

Erkenntnisse und Entdeckungen nach 1630.

Die Erdkugel.

§ 271. In den Jahrhunderten nach der Entdeckung von Amerika begannen die Westeuropäer — ebenso wie seinerzeit die Griechen (Eratosthenes, § 28, und Posidonius, § 52) und die Mohammedaner (Al Mamun, § 57) — die Größe des Erdballs zu ermitteln. Den Breitenunterschied zweier Orte zu bestimmen, hatte man seit langer Zeit verstanden. Man hatte zu diesem Zwecke nur die Polhöhe an beiden Orten zu ermitteln und den Unterschied derselben zu nehmen (§ 46). Bedeutend schwieriger war es, die Entfernung der Orte in Längenmaß genau zu ermitteln.

Jean Fernel, ein angesehener Arzt in Paris, führte 1525 eine derartige Messung in der Weise aus, daß er von Paris nach Amiens fuhr und die Anzahl der Umdrehungen der Räder seines Wagens zählte. Da der Weg nicht ganz gerade war, mußte Fernel an der ermittelten Weglänge eine Berichtigung anbringen. Er fand für die Länge eines Breitengrades den ziemlich genauen Wert von 57070 Toisen (1 Toise = 6 Pariser Fuß = 1,949 Meter).

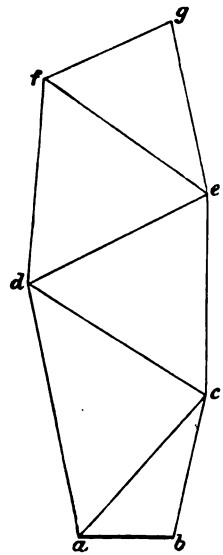
Die nächste Messung wurde 1615 vom Holländer Snellius (§ 106) ausgeführt. Sein Hauptverdienst besteht darin, daß er bei diesen Messungen die Methode der Triangulation einführte. Sie gründet sich auf den Satz, daß ein Dreieck bestimmt ist und daß man seine Stücke berechnen kann, wenn man eine Seite und die beiden anliegenden Winkel kennt (§ 23). Wenn man zunächst an einer ebenen und bequemen Stelle eine Linie ab (Fig. 265, a. f. S.) abgemessen hat, so hat man keine weiteren Linien zu messen, sondern man kann alles übrige durch Winkelmessungen und durch Rechnung ermitteln. Man wählt dann Punkte, die im Terrain hervorragen und die oft weit voneinander entfernt sind, nur so, daß man von dem einen Punkte aus den anderen sehen kann. An diesen Punkten werden Stangen oder andere Marken angebracht, auf die man das Winkelmeßinstrument einstellen kann. Hat man im Dreieck abc die Winkel a und b (zur Kontrolle vielleicht auch c) gemessen, so kann man ac berechnen. Dann benutzt man diese Linie als Grundlinie

Digitized by Google

des Dreiecks acd, mißt die Winkel dieses Dreiecks und berechnet cd u. s. w. Wenn so der Zwischenraum zwischen den beiden Stationen mit bekannten Dreiecken ausgefüllt ist, läßt sich der Abstand der beiden Stationen berechnen.

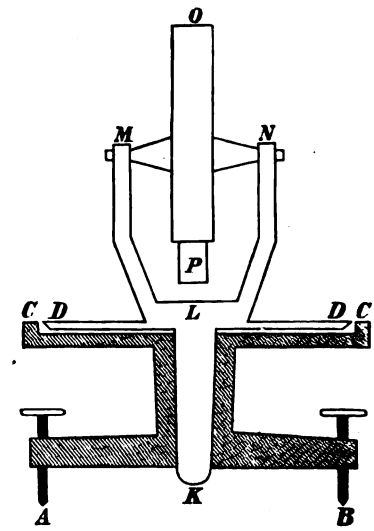
Später wurden Messungen vom Engländer Norwood und vom Italiener Riccioli ausgeführt. Der erstere fand für die Länge eines Grades 57424 Toisen, der letztere 61478 Toisen. Da die Ergebnisse dieser Messungen sehr voneinander abwichen, beauftragte Ludwig XIV. im Jahre 1667 den Physiker Jean Picard, eine neue Gradmessung vorzunehmen. Picard war 1620 in La Flèche geboren, wurde eins der ersten sieben Mitglieder der

Fig. 265.



Triangulierung.

Fig. 266.



Theodolit.

Pariser Akademie und starb in Paris 1682. Abgesehen davon, daß Picard für die Länge des Grades den sehr genauen Wert 57060 Toisen fand, hat er sich besonders dadurch verdient gemacht, daß er die Winkelmessungen nicht mit einem einfachen Visier ausführte, sondern daß er sich eines Instrumentes bediente, welches mit einem Fernrohr und einem Fadenkreuz (§ 204) ausgestattet war.

§ 272. Hiermit war der wesentlichste Schritt zur Konstruktion des sogenannten Theodolits getan, der zu verschiedenen Zwecken, namentlich bei geodätischen Vermessungen, gebraucht wird. Fig. 266 zeigt einen vertikalen Durchschnitt durch einen Theodolit. Der schraffierte Teil ist ein solides Stativ mit einer vertikalen Ausbohrung und einer ringförmigen Scheibe CC mit einer feinen Gradeinteilung. Innerhalb dieser Scheibe und dicht an dieselbe anschließend befindet sich eine zweite Scheibe DD, an der die Gabel $KLMN$ befestigt ist. Der runde Schaft K dreht sich in der Ausbohrung des Stativs,

Digitized by Google

und die Gabel trägt die Achslager für das Fernrohr PO. — Durch drei Stellschrauben an den Füßen des Stativs, von denen in der Figur zwei (A und B) sichtbar sind, kann das Instrument so gestellt werden, daß die Achse KL vertikal ist, was an der Libelle, Fig. 267, die auf der Fernrohrachse angebracht ist, erkannt wird. Wenn mit dem beweglichen Teil des Instrumentes eine volle Umdrehung gemacht werden kann, ohne daß sich die Luftblase der Libelle verschiebt, so ist KL vertikal. Ob die Fernrohrachse horizontal ist, erkennt man durch Umsetzen der Libelle.

Fig. 267.

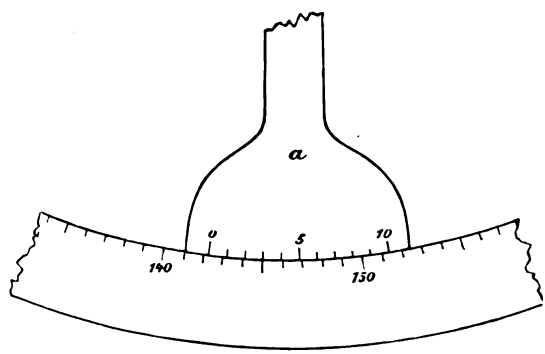
Libelle.

Mit dem Fernrohr und dem in demselben angebrachten Fadenkreuz kann man außerordentlich scharf auf die Marke der entfernten Station visieren. Dann muß die Stellung der Marke auf der Scheibe D gegen die Teilung von C abgelesen werden, und zwar so genau wie möglich, viel feiner, als durch unmittelbares Ablesen der Teilstriche der Scheibe.

§ 273. Diese Ablesungen werden vermittelst eines sogenannten Nonius ausgeführt. Die Vorrichtung ist nach dem Portugiesen Pedro Nuñez benannt, der 1542 über ein anderes Hilfsmittel zu ähnlichem Gebrauche geschrieben hat. Auch Regiomontanus und Tycho Brahe hatten verschiedene Hilfsmittel, welche eine ähnliche Genauigkeit in der Ablesung bezweckten (vergl. Fig. 41). Der eigentliche Nonius, den die Franzosen mit Recht einen „Vernier" nennen, ist zuerst in einem Buche beschrieben worden, welches 1631 von Pierre Vernier oder Peter Werner (geb. 1580, gest. 1537) herausgegeben wurde.

Die Einrichtung dieses wichtigen Apparates, der je nach dem Instrument, zu dem er gehört, und je nach der Art der Teilung verschiedene Formen haben kann, ist aus Fig. 268 zu ersehen. Selbstverständlich kann er auch an einem geraden Maßstab angebracht werden. Auf dem beweglichen Teil a befindet sich der Nullpunkt. Von diesem aus werden zunächst die vollen Grade, in der Figur 142°, abgelesen. Der Bruchteil eines Grades, der noch zu den 142° hinzukommt, ergibt sich nun vermittelst des Nonius in folgender Weise. Eine Strecke, die 9 Grad der festen Teilung umfaßt, ist auf den beweglichen Teil a übertragen, hier

Fig. 268.

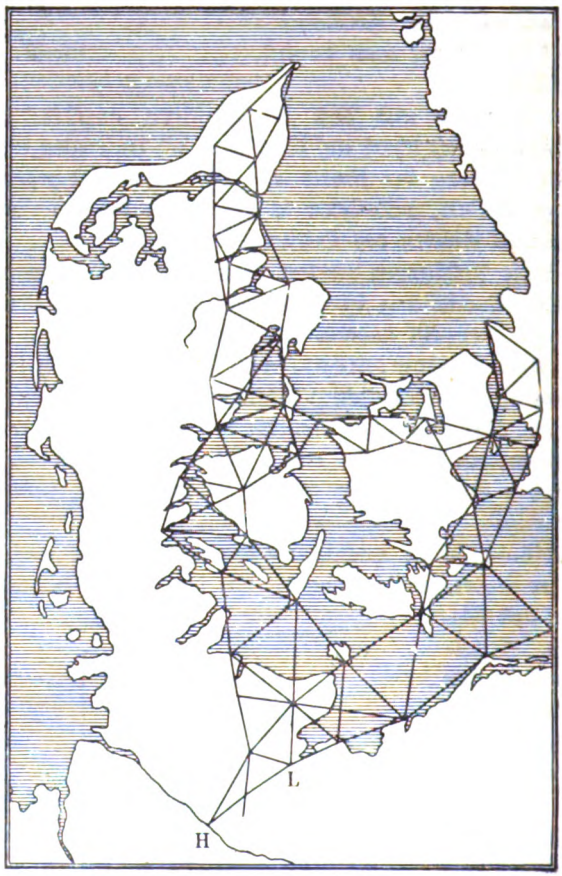


Nonius.

Digitized by Google

aber nicht in 9, ſondern in 10 gleiche Teile geteilt. Jeder dieſer Teile iſt alſo gleich $^9/_{10}$ Grad. Nun fällt immer einer der Teilſtriche der feſten Teilung mit einem Teilſtrich des Nonius zuſammen. In Fig. 268 iſt es der dritte Teilſtrich des Nonius. Alſo iſt der abzuleſende Winkel 142,3°. Da nämlich der Strich 3 mit einem Strich der feſten Teilung zuſammenfällt, ſo iſt der Strich 2 um $^1/_{10}$, der Strich 1 um $^2/_{10}$ und der Strich 0 um $^3/_{10}$ vom entſprechenden Strich der feſten Teilung entfernt.

Fig. 269.



Däniſche Gradmeſſung.

§ 274. Fig. 269 gibt eine Vorſtellung von der im 19. Jahrhundert ausgeführten däniſchen Gradmeſſung. Die urſprünglich gemeſſene Grundlinie iſt ſo klein, daß ſie auf der Karte nicht angegeben werden kann. Sie iſt eine Linie von 2500 Meter Länge auf Amager, die mit vier Stahlſtangen gemeſſen wurde. Die Stangen wurden in horizontaler Lage vorſichtig an-

Digitized by Google

einandergelegt, aber so, daß sie sich nicht berührten. Die Durchmesser der Zwischenräume wurden durch Einsenken eines Glaskeils von bekannten Dimensionen ermittelt.

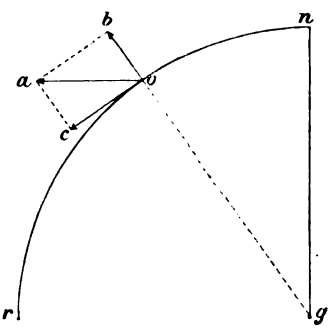
Wie man aus der Karte ersieht, kann man auf weite Entfernungen hin visieren, so daß nur eine verhältnismäßig geringe Anzahl von Dreiecken erforderlich ist, um Strecken zu überspannen wie die von Schonen über die dänischen Inseln nach Ostjütland bis nach Skagen, über den kleinen Belt nach Hamburg oder den Sund entlang über die südlichen dänischen Inseln bis nach Mecklenburg und von da nach Hamburg.

§ 275. Bei den bisher erwähnten Messungen hatte man stillschweigend vorausgesetzt, daß die Erde eine Kugel sei, daß sie also überall gleich stark gekrümmt sei. Durch eine zufällige Beobachtung sollte dies jedoch in Frage gestellt werden. Die Pariser Akademie sandte 1671 eins ihrer Mitglieder, Richer, nach Cayenne in Südamerika, der hier astronomische Beobachtungen machen sollte. Zu seiner Ausrüstung gehörte unter anderem eine Pendeluhr, die vor der Abreise richtig ging, die aber in Cayenne täglich zwei Minuten nachging, und Richer mußte das Pendel um $1^1/_4$ Linien verkürzen, damit die Uhr wieder richtig ging. Als er 1673 nach Paris zurückkehrte, zeigte es sich, daß die Uhr täglich zwei Minuten vorging, und das Pendel mußte wieder um $1^1/_4$ Linien verlängert werden, damit die Uhr wieder richtig ging.

Ähnliches wurde über Pendeluhren berichtet, die an der Küste von Afrika und in Westindien zu langsam gingen. Die allgemeine Ansicht war die, daß die Verlängerung, welche das Pendel in den tropischen Gegenden durch die Wärme erleidet, die ausschließliche Ursache der Verzögerung im Gange der Pendeluhren sei.

Huygens, der Erfinder der Pendeluhr und der Berechner der Zentrifugalkraft (§ 174), erkannte jedoch, daß die Wirkung der Wärme nicht ausreiche, um die Erscheinung zu erklären, und daß die Hauptursache der Verzögerung eine ganz andere sei. Die Zentrifugalkraft ist nämlich infolge der Achsendrehung der Erde am Äquator am größten und wirkt hier der Schwerkraft direkt entgegen. Wenn aber die Schwerkraft vermindert wird, so muß das Pendel langsamer schwingen und die Uhr nachgehen. — Die Berechnungen Huygens' bestätigten die Richtigkeit dieser Erklärung.

Fig. 270.



Wirkung der Zentrifugalkraft.

§ 276. Huygens untersuchte nun die Wirkungen der Zentrifugalkraft an anderen Stellen der Erdoberfläche, z. B. in unserer Breite, Fig. 270. Im Punkt a muß sie offenbar die Richtung oa senkrecht zur Erdachse ng haben. Nun kann oa in die beiden Komponenten ob und oc zerlegt werden. Die erstere vermindert die Schwerkraft, und die letztere strebt die

Digitized by Google

Gegenstände nach dem Äquator hin zu treiben, was sich jedenfalls beim Wasser (dem Meer) geltend machen muß. Dieses muß sich also in den Äquatorialgegenden ansammeln, so daß das Meer eine abgeplattete Form haben muß. Der Abstand von Pol zu Pol muß kleiner sein als der Durchmesser des Äquators. Da nun die Form der festen Erde nicht viel von der Form des Meeres abweicht — selbst die höchsten Berge sind ja nicht viel höher als eine Meile — muß die Erdkugel selbst abgeplattet sein. Huygens veranschaulichte dies dadurch, daß er eine weiche Tonkugel an einer Achse befestigte und in Drehung versetzte. Die Kugel wurde infolge der Rotation abgeplattet.

Huygens berechnete die Größe der Abplattung der Erde und fand den Wert $^1/_{578}$, d. h. der Äquatorialdurchmesser sollte um $^1/_{578}$ größer sein als der Polardurchmesser. Newton dagegen fand für die Abplattung ungefähr den doppelten Wert, nämlich $^1/_{230}$.

Daß die beiden Resultate so stark voneinander abweichen, hat seinen Grund darin, daß sich Huygens die gesamte Schwerkraft im Mittelpunkt der Erde vereinigt dachte, während sich Newton dieselbe im ganzen Erdkörper gleichmäßig verbreitet dachte. Keins von beiden ist richtig. Daher liegt der wahre Wert der Abplattung zwischen dem von Huygens und dem von Newton gefundenen Wert. Er ist annähernd $^1/_{300}$ (genau $^1/_{293}$).

§ 277. Die genaue Ermittelung dieser Zahl hat jedoch ziemlich viel Zeit beansprucht. Da er aus den früheren Messungen nicht abgeleitet werden konnte, veranlaßte Ludwigs XIV. Minister Colbert auf Anregung Picards eine Gradmessung, die sich von Paris aus nach Norden und nach Süden erstreckte. Die Ausführung der Messung wurde 1680 den hervorragendsten Mitgliedern der Akademie übertragen. Nach Colberts Tod kam die Arbeit von 1683 bis 1700 ins Stocken und sie wurde erst 1718 beendet. Das Resultat war folgendes. Der Bogen von Paris bis Dünkirchen umfaßte $2^0\,45'\,50''$, der von Paris bis Collioure (an der spanischen Grenze) $6^0\,18'\,47''$. Die Länge eines Grades war auf dem ersteren Bogen 56 960 Toisen, auf dem letzteren 57 097 Toisen.

Die Verschiedenheit der Länge eines Grades auf den beiden Strecken wurde von Cassini und anderen sofort als Beweis angesehen, daß die Erde nicht eine genaue Kugel sei. Da die Krümmung da am geringsten sein muß, wo die Grade am größten sind, so mußte die Krümmung in der Nähe des Äquators geringer sein als weiter nach Norden hin. Die Erde mußte also in der Richtung der Drehungsachse gestreckt sein.

Huygens war inzwischen gestorben, und Newton war alt, aber die Landsleute des letzteren nahmen den Kampf gegen die Franzosen auf und behaupteten, die Messungen müßten fehlerhaft und die Erde müsse an den Polen abgeplattet sein.

§ 278. Auch eine in den Jahren 1733 und 1734 vorgenommene Längenmessung von der Westküste der Bretagne bis nach Straßburg schien zu Gunsten der Ansicht der Franzosen zu sprechen. Allein die Engländer ließen sich hierdurch nicht überzeugen. Die Abweichung war zu geringfügig,

Digitized by Google

als daß man aus ihr einen sicheren Schluß hätte ziehen können. Da ging endlich Ludwigs XV. Minister Maurepas auf den Antrag der Akademie ein, eine Gradmessung in ganz anderen Gegenden vorzunehmen. Maurepas erhielt von der spanischen Regierung die Erlaubnis, eine Messung in dem spanischen Gebiet in Peru vorzunehmen. Im Jahre 1735 ging eine große Expedition unter Condamine, Godin und Bouguer und zwei spanischen Seeoffizieren ab. Der Expedition stellten sich mannigfaltige Schwierigkeiten entgegen, und es dauerte lange, bis man sich in die dortigen Verhältnisse eingelebt hatte. Im Jahre 1741 war man nicht weiter gekommen, als daß man sich einigte, alles, was bis dahin getan war, zu kassieren und von vorn anzufangen.

Jetzt machte die Arbeit Fortschritte, aber nun erhoben sich Zwistigkeiten zwischen den Mitgliedern der Expedition. Eines schönen Tages im Jahre 1744 war Bouguer verschwunden. Er hatte über Mexiko die Heimreise angetreten, und Condamine erfuhr es erst nach sechs Wochen, als er sich am entgegengesetzten Ende der Linie befand. Er begab sich an den Amazonenstrom, nahm diesen gründlich auf und kehrte 1746 zurück. Die spanischen Seeoffiziere nahm ihren Rückweg um das Kap Horn. Der eine von ihnen, Ulloa, fiel den Engländern in die Hände und wurde nach London gebracht, wo er jedoch alsbald wieder freigelassen wurde. Nur Godin blieb bis 1748 in Peru, wo er ein heftiges Erdbeben erlebte. Erst 1750 kehrte er über Buenos Aires zurück. Er übernahm eine Lehrerstelle und starb, ohne einen Bericht erstattet zu haben. Die anderen bekämpften sich auf das heftigste, bis sie sich schließlich einigten, das Folgende als Ergebnis ihrer Arbeiten zu veröffentlichen. Sie hatten ungefähr $1^1/_2{}^0$ nördlich und $1^1/_2{}^0$ südlich vom Äquator, im ganzen $3^0\ 7'\ 4''$, gemessen.

Als Länge eines Grades hatte

Bouguer	56753 Toisen,
Condamine . . .	56749 „
Ulloa.	56768 „

gefunden. Da die Messung auf einem Hochlande ausgeführt worden war, mußte das Resultat derselben noch auf den Meeresspiegel reduziert werden. Schließlich ergab sich für die Länge eines Grades am Äquator der Wert 56 732 Toisen.

§ 279. Noch bevor das Resultat bekannt geworden war, beschloß die Akademie auf Anregung von Celsius, der sich damals in Paris aufhielt, im Jahre 1736 eine Gradmessung im Norden vorzunehmen. Eine Expedition, an deren Spitze Maupertuis stand, begab sich nach Lappland, wo unter dem Beistand der schwedischen Regierung und unter Mitwirkung von Celsius ein Grad gemessen wurde, und zwar größtenteils auf dem Eise. Bereits im Jahre 1737 kam die Expedition mit dem Ergebnis zurück, daß ein Grad bei Torneå unter dem Polarkreis 57437 Toisen lang ist. Dieser Wert ist allerdings etwas größer als derjenige, den später die Schweden fanden, nämlich

Digitized by Google

57196, allein, nachdem auch die Expedition nach Peru mit ihren Arbeiten zu Ende gekommen war, hatte man die folgenden Werte für die Länge eines Grades in

$66\frac{1}{2}^0$ nördl. Breite	. . .	57437	Toisen,
45^0 „ „	. . .	57023	„
0^0 „ „	. . .	56732	„

Nun war jeder Zweifel ausgeschlossen. Die Franzosen hatten bewiesen, daß Huygens und Newton recht gehabt hatten.

Endlich wurde 1792 in Frankreich auf Beschluß der Nationalversammlung eine neue großartige Gradmessung begonnen, die sich durch ganz Frankreich und über Spanien bis nach Formentera (Pityusen) erstreckte. Auch hier trat, wenn auch in geringerem Grade, dasselbe Gesetz für die Krümmung der Erde zutage.

§ 280. Diese Messung wurde hauptsächlich deshalb unternommen, um ein neues Längenmaß festzusetzen, indem der Meridian vom Pol bis zum Äquator 10000000 Meter sein sollte. Eine Kommission von französischen Mathematikern hatte sich nämlich im voraus zu Gunsten einer solchen Bestimmung ausgesprochen. Der frühere Vorschlag von Huygens, das Sekundenpendel als Einheit zu wählen (der dritte Teil der Länge sollte ein Zeitfuß heißen), wurde verworfen, weil er einen anderen Begriff (die Zeit) einführte. Nach Beendigung der Gradmessung und der erforderlichen Berechnungen wurde 1799 das Meter als die Länge von 443,296 Linien definiert. In demselben Jahre wurde ein Urmaß aus Platin im Bureau international des Poids et Mesures in Paris niedergelegt. Später hat sich herausgestellt, daß der Wert 443,296 nicht ganz genau ist, sondern daß der 10000000te Teil des Erdquadranten gleich 443,334 ist. Man hat jedoch das einmal definierte Meter beibehalten, so daß der Erdquadrant nicht genau gleich 10000000, sondern gleich 10000856 Meter ist.

§ 281. Ein Hauptvorzug des metrischen Maßsystems vor anderen Systemen besteht darin, daß es ein reines Dezimalsystem ist, d. h. daß alle größeren und kleineren Maße aus der Maßeinheit durch Verzehnfachung und durch Zehnteilung abgeleitet werden:

1 Kilometer[1])	= 1000 Meter,	1 Dezimeter[2])	= 0,1 Meter,
1 Hektometer	= 100 „	1 Zentimeter	= 0,01 „
1 Dekameter	= 10 „	1 Millimeter	= 0,001 „

Die Flächenmaße und Raummaße sind Quadratmeter, Quadratzentimeter, Kubikmeter, Kubikzentimeter u. s. w. Ein Kubikdezimeter hat den Namen Liter. Ein Kubikmeter ist also ein Kiloliter (10 Hektoliter).

Die Gewichtseinheit, das Gramm, ist das Gewicht eines Kubikzentimeters destillierten Wassers bei 4° C., d. h. bei der Temperatur seiner größten

[1]) Die griechischen Namen für 1000, 100, 10.
[2]) Die lateinischen Namen für 10, 100, 1000.

Digitized by Google

Dichtigkeit. Ein Liter Wasser wiegt also ein Kilogramm. Die Namen der Vielfachen und der Bruchteile des Gramms sind:

1 Kilogramm	= 1000 Gramm,	1 Dezigramm	= 0,1 Gramm,
1 Hektogramm	= 100 „	1 Zentigramm	= 0,01 „
1 Dekagramm	= 10 „	1 Milligramm	= 0,001 „

Die Geschwindigkeit des Lichtes.

§ 282. Zu den ausgezeichneten Männern, welche die französische Akademie an sich zog, gehörte der Italiener Giovanni Domenico Cassini. Er stammte aus vornehmer Familie und war 1625 in Perinaldo bei Nizza geboren. Nach Beendigung seiner Studien in Genua und Bologna wurde er an letzterem Orte Professor der Astronomie. Hier führte er verschiedene astronomische Arbeiten aus und veröffentlichte Tabellen über die Jupitermonde. Picard, der auf die Arbeiten Cassinis aufmerksam geworden war, veranlaßte, daß dieser als Mitglied der Akademie und königlicher Astronom nach Paris berufen wurde. Cassini siedelte 1669 nach Paris über.

Er entwickelte nun in den folgenden 41 Jahren eine große Tätigkeit auf der Sternwarte, entdeckte unter anderem vier Monde des Saturn[1]) und veröffentlichte nicht weniger als 176 Abhandlungen in den Schriften der Akademie. Er starb im Jahre 1712 und wurde der Stammvater einer Reihe von ausgezeichneten Gelehrten, die sämtlich Mitglieder der Akademie wurden. Drei von ihnen waren auch, wie der Stammvater, Direktoren der Pariser Sternwarte, und zwar folgte dreimal nacheinander der Sohn auf den Vater. Die Namen dieser Nachkommen Domenico Cassinis sind die folgenden:

Jacques Cassini, 1677 — 1756,
César François Cassini, 1714 — 1784,
Jacques Dominique Cassini, 1748 — 1845.

Mit dem zuletzt genannten starb die Familie aus. Sein einziger Sohn, Alexandre Henri Gabriel Cassini, der Botaniker war, war bereits 1832 gestorben, ohne Nachkommen zu hinterlassen.

§ 283. Ein anderer Gelehrter, der von Picard veranlaßt wurde, nach Paris überzusiedeln, war Ole Römer (Fig. 271, a. f. S.).

Um die Beobachtungen Tycho Brahes, die in den folgenden Jahrhunderten trotz der Erfindung des Fernrohrs immer noch von unschätzbarem Werte waren, besser ausnutzen zu können, kam 1671 eine französische Expedition unter Picards Leitung nach Kopenhagen mit der Absicht, den Meridian der Uranienburg genau zu bestimmen. Picard war der rechte Mann für ein solches Unternehmen, da er über gute Instrumente verfügte und von der kurz

[1]) Von den acht Monden des Saturn ist Nr. 6 (1655) von Huygens, Nr. 8 (1671), Nr. 5 (1672), Nr. 3 und 4 (1684) von Cassini, Nr. 1 und 2 (1789) von Herschel und Nr. 7 (1848) von Bond entdeckt worden.

Digitized by Google

vorher ausgeführten Gradmessung (§ 271) her die erforderliche Übung in derartigen Beobachtungen hatte. Als er sich wegen dieser Angelegenheit mit

Fig. 271.

Ole Römer.

den Behörden in Kopenhagen in Verbindung setzte, wurde ihm der junge Römer als Gehilfe bei Ausführung der Gradmessung empfohlen.

Ole Römer war 1644 in Aarhus geboren, besuchte die Kathedralschule dieser Stadt und studierte dann in Kopenhagen. Hier war einer seiner Lehrer Rasmus Bartholin (1625 bis 1698), der Entdecker der Doppelbrechung des Lichtes im isländischen Kalkspat. Er war Bartholin bei der Heraus-

Digitized by Google

gabe von Tycho Brahes Beobachtungen behilflich gewesen, und von diesem wurde er Picard als Gehilfe empfohlen.

Nachdem die Arbeiten auf der Insel Hveen beendet waren, ging Römer mit Picard nach Paris. Hier wurde er alsbald Mitglied der Akademie und Lehrer der Mathematik des Dauphin. Er wirkte bei der Anlage der Wasserkünste in Versailles und Marly mit, erfand verschiedene Instrumente und hat unter anderem das Verdienst, die richtige Form der Zähne eines Zahnrades (Epicykloide) angegeben zu haben. Von größter Wichtigkeit sind seine astronomischen Beobachtungen, die er gemeinsam mit Picard und namentlich mit D. Cassini ausführte.

Es handelte sich bei diesen Beobachtungen um die Messung des Zeitunterschiedes zwischen zwei aufeinander folgenden Eintritten oder Austritten der Jupitermonde aus dem Schatten des Planeten. Diese Erscheinung, die mit ganz schwachen Fernrohren beobachtet werden kann, ist an und für sich von astronomischem Interesse mit Hinsicht auf die Bestimmung der Umlaufszeiten der Jupitermonde. Man erkannte aber auch alsbald, daß die Erscheinung, sobald sie hinreichend studiert und berechnet sein würde, für den Seemann und den Entdeckungsreisenden von Nutzen sein könne.

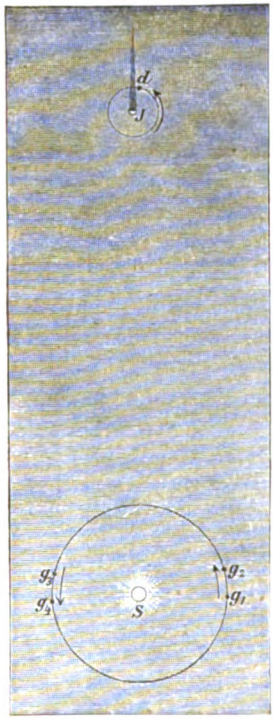
Der Eintritt eines Jupitermondes in den Schatten wird nämlich an jedem Orte der Erde zu derselben Zeit beobachtet. Schon Galilei hatte daher vorgeschlagen, diese Erscheinung bei geographischen Ortsbestimmungen als eine Art Weltuhr zu benutzen, ähnlich wie Hipparch die Mondverfinsterungen benutzt hatte (§ 47). Die Verfinsterungen der Jupitermonde sind aber einer viel ausgedehnteren Anwendung fähig, da die Erscheinung fast jeden Tag zu beobachten ist. Jupiter selbst ist eine große Scheibe, und die Bahnen seiner Monde fallen so nahe mit seiner eigenen Bahn zusammen, daß die drei innersten Monde bei jedem Umlauf den Schatten passieren müssen. Selbst der vierte geht öfter durch den Schatten hindurch, als neben demselben vorbei. Könnte man genaue Tabellen über das Eintreffen dieser Erscheinungen im voraus berechnen, so würden diese dem Seemann denselben Dienst wie ein feines Chronometer leisten können. Die Berechnung ist jedoch nicht ganz einfach, da infolge der elliptischen Form der Jupiterbahn sowie der Mondbahnen die Erscheinungen sich nicht in gleichen Zeitintervallen wiederholen.

Cassini und Römer nahmen die Arbeit in Angriff, und unter den Unregelmäßigkeiten, die sich zeigten, fand sich auch die, daß die Zeit, welche zwischen zwei Verfinsterungen eines Mondes verfließt, zu einer Zeit des Jahres etwas kürzer ist als zu einer anderen. In Fig. 272 (a. f. S.) sei S die Sonne, g_1, g_2, g_3, g_4 die Erde an verschiedenen Stellen ihrer Bahn, J Jupiter und d einer seiner Monde. Es zeigte sich, daß die Zeit zwischen zwei Verfinsterungen kleiner war, wenn sich die Erde bei $g_1 g_2$ befindet, als wenn sie sich bei $g_3 g_4$ befindet. Da man nicht annehmen konnte, daß die Stellung der Erde einen wirklichen Einfluß auf die Jupitermonde ausübt, so nahmen Cassini und Römer an, daß die Erscheinung ihren Grund darin hat, daß die Erde bei $g_1 g_2$ sozusagen dem Licht entgegenkommt und daß daher, wenn

Digitized by Google

wir in g_2 ankommen, die Erſcheinung früher eintritt, als wenn wir in g_1 geblieben wären. Bewegt ſich dagegen die Erde von g_3 nach g_4, ſo muß das Licht, welches uns erſt bei g_4 einholt, etwas ſpäter ankommen, als wenn wir im Punkt g_3 geblieben wären. Die Verſchiebung von g_1 nach g_2 iſt durchaus keine Kleinigkeit. Die Erde legt in der Sekunde ungefähr 4 Meilen in ihrer Bahn zurück, und die Umlaufszeit des innerſten Mondes, der ſich am ſchnellſten bewegt, iſt ungefähr 42,5 Stunden. Alſo legt die Erde zwiſchen zwei aufeinander folgenden Verfinſterungen dieſes Mondes 42,5 . 60 . 60 . 4, d. h. annähernd 600 000 Meilen zurück. Die Verfinſterung tritt alſo bei g_2 ungefähr 15 Sekunden zu früh, bei g_4 15 Sekunden zu ſpät ein.

Fig. 272.



Verfinſterung der Jupitermonde von der Erde aus geſehen.

Als Caſſini zum erſtenmal in der Akademie über dieſe Erſcheinung berichtete, erhob ſich von verſchiedenen Seiten Widerſpruch gegen ſeine Auffaſſung.

Nach einem Vorſchlag Galileis hatte die Accademia del Cimento die Fortpflanzungsgeſchwindigkeit des Lichtes dadurch zu ermitteln verſucht, daß zwei Perſonen in einer gegenſeitigen Entfernung von einer Meile einen Schirm vor ein Licht hielten. Zu einer verabredeten Zeit entfernte der eine den Schirm, und ſobald der andere das Licht erblickte, ſollte dieſer ſeinen Schirm entfernen. Die Zeit, welche von dem Augenblicke an, in dem der erſte den Schirm entfernte, bis zu dem Augenblick verfloß, in dem er das Licht des anderen erblickte, mußte die Zeit ſein, welche das Licht braucht, um den gegenſeitigen Abſtand der beiden Perſonen zweimal zu durchlaufen. Der Verſuch führte jedoch zu keinem Reſultat, da die verfloſſene Zeit gerade diejenige zu ſein ſchien, welche die beiden Beobachter zur Ausführung der Bewegung nötig hatten. Die meiſten pflichteten jetzt der übrigens wunderlichen Behauptung Descartes' bei, daß das Licht zur Fortpflanzung überhaupt keine Zeit brauche. Caſſini ließ jetzt die Sache fallen, Römer dagegen nicht. Er ſetzte vielmehr ſeine Studien fort und brachte 1675 in der Akademie ſelbſt weitere Beweiſe für die Richtigkeit ſeiner Anſicht bei. Bei dieſer Gelegenheit gehörte ſogar Caſſini zu ſeinen Gegnern, und nur eine geringe Anzahl von Mitgliedern, unter dieſen allerdings Huygens, ſtanden auf ſeiner Seite. Erſt im folgenden Jahrhundert ſollte es ſich zeigen, daß Römer recht hatte, und daß ſich das Licht mit einer Geſchwindigkeit

Digitized by Google

von 40 000 Meilen in der Sekunde im Raum fortpflanzt. Aber trotzdem die Sache diesen Verlauf nahm, ist es niemandem eingefallen, Römer die Ehre, der Entdecker der Lichtgeschwindigkeit zu sein, streitig zu machen.

Bereits im Jahre 1675 hatte Römer durch seine Arbeiten ein solches Ansehen erlangt, daß ihm ein Lehrstuhl an der Universität in Kopenhagen angeboten wurde. Er siedelte jedoch erst 1681 — nach Aufhebung des Edikts von Nantes — nach Kopenhagen über und entfaltete hier eine bedeutende Tätigkeit, sowohl auf dem Gebiete der Wissenschaft, als auf dem Gebiete der Verwaltung. Er wurde Mitglied des obersten Gerichtshofes und Polizeidirektor in Kopenhagen. Er machte sich verdient um die Einführung einheitlichen Maßes und Gewichtes im ganzen Lande, um Verbesserung der Wege und des Verkehrswesens, um die Straßenbeleuchtung und das Feuerlöschwesen der Stadt Kopenhagen, um das Münzwesen, das Steuerwesen und um die Einführung des Gregorianischen Kalenders (§ 19), die im Jahr 1700 erfolgte. Trotz dieser vielseitigen Tätigkeit auf dem Gebiete der Verwaltung fand er noch Zeit zu astronomischen Beobachtungen, die er teils auf dem Runden Turm, teils auf seinem Privatobservatorium in seiner Villa vor der Stadt anstellte. Dabei besaß Römer eine außergewöhnliche Erfindungsgabe. Nach seinem 1710 erfolgten Tode fanden sich auf dem Observatorium 54 Instrumente, die von ihm erfunden und zum Teil von ihm selbst angefertigt worden waren, so daß man ihn den nordischen Archimedes genannt hat. Er hat die meisten Grundformen für die astronomischen Instrumente gefunden, wie sie noch heute in Gebrauch sind, und er verstand diese Instrumente so gut zu gebrauchen und gebrauchte sie so fleißig, daß man ihn in dieser Hinsicht einen würdigen Nachfolger Tycho Brahes nennen kann. Er hinterließ eine große Anzahl ausgezeichneter Beobachtungen, die größtenteils bezweckten, die Parallaxe der Fixsterne zu finden (s. § 70). Ebenso wie Brahe kam auch Römer nicht zur Bearbeitung seines riesigen Beobachtungsmaterials, obwohl auch er, wie Brahe in Kepler, einen ausgezeichneten Gehilfen besaß. Dieser Gehilfe war Peter Horrebow, geb. 1679 in Lögstör in Jütland als Sohn eines armen Fischers. Er studierte seit 1703 in Kopenhagen Theologie und Medizin und wurde mit Ole Römer bekannt, der ihn in Mathematik und Physik unterrichtete. Er unterstützte Römer bei seinen astronomischen Beobachtungen und setzte sie nach dessen Tode fort. Leider wurden die Manuskripte durch die große Feuersbrunst im Jahre 1728 zerstört. Horrebow flüchtete sich aus seiner Wohnung auf die Sternwarte. Als er jedoch sah, daß sich der Wind drehte, so daß auch die Sternwarte in Gefahr kam, packte er seine eigenen und Römers Beobachtungen in zwei Kisten und suchte diese in Sicherheit zu bringen, was jedoch leider nicht gelang. Nur ein verschwindend kleiner Teil der Beobachtungen Römers wurde gerettet und später von verschiedenen Astronomen, namentlich Galle in Berlin (1845), bearbeitet. — Horrebow starb 1764.

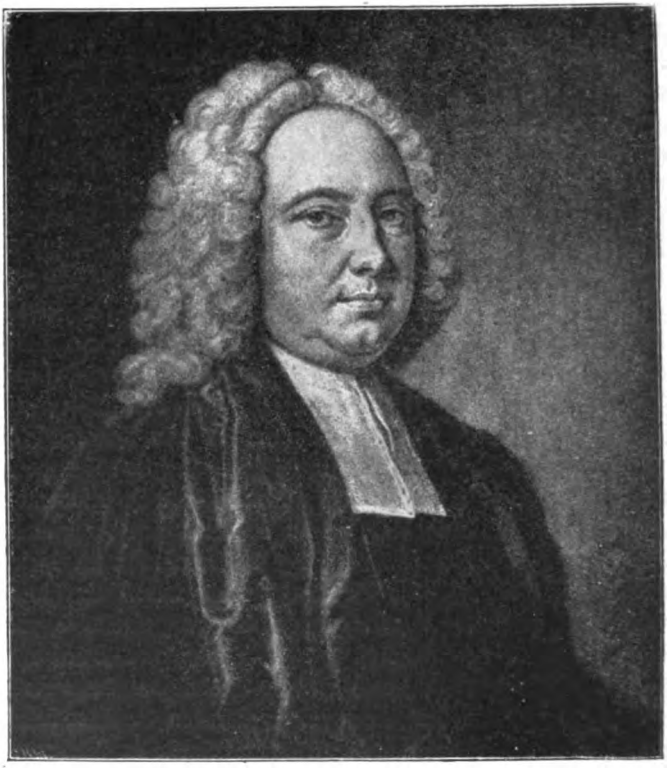
Daß die Richtigkeit des von Römer gefundenen Wertes für die Geschwindigkeit des Lichtes vielfach in Zweifel gezogen wurde, ist nicht zu ver-

Digitized by Google

wundern, da die Bewegung der Jupitermonde infolge der vielfachen Einflüsse, die gleichzeitig wirksam sind, eine äußerst verwickelte Erscheinung ist.

§ 284. Einen ganz anderen Weg schlug James Bradley ein, um die Geschwindigkeit des Lichtes zu ermitteln. Er war 1692 geboren, studierte in

Fig. 273.



James Bradley.

Oxford Theologie und wurde 1719 Diakon in Wanstead. Hier fing er an, sich mit Mathematik und Astronomie zu beschäftigen, und er machte in diesen Wissenschaften so bedeutende Fortschritte, daß er 1721 als Professor der Astronomie nach Oxford berufen wurde, wo ihm allerdings keine bedeutenden Hilfsmittel zu Gebote standen. (Fig. 273.)

Schon Kopernikus hatte versucht, eine Parallaxe der Fixsterne, d. h. eine jährliche Verschiebung derselben infolge der Bewegung der Erde um die Sonne nachzuweisen, allein seine Meßinstrumente waren bei weitem nicht fein genug, um eine solche Bewegung feststellen zu können. Später hatten Picard, Flamsteed, der erste Direktor der von Karl II. errichteten Sternwarte in Greenwich, und andere Astronomen ähnliche Beobachtungen gemacht. Sie hatten wohl kleine Änderungen in der Stellung einiger Fixsterne beob-

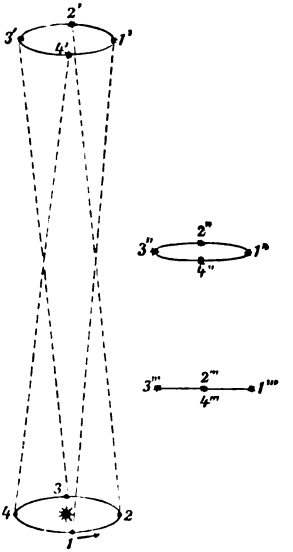
Digitized by Google

achtet, aber sie hatten das Wesen derselben nicht erkannt. Möglicherweise hätten die Beobachtungen Römers die Sache aufklären können, aber diese waren leider verloren gegangen.

Nun stand Bradley in Verkehr mit Samuel Molyneux, dem Besitzer einer Privatsternwarte in Kew, die mit guten Instrumenten ausgestattet war. Dieser hatte sich ein Instrument zum Messen von Zenitdistanzen (Zenitsektor) anfertigen lassen, an dem die Winkel bis auf eine Sekunde genau abgelesen werden konnten. Mit diesem Instrument wurden 1725 von Molyneux Beobachtungen am Stern γ im Sternbild des Drachens begonnen, an denen sich auch Bradley beteiligte und die ein ganzes Jahr lang fortgesetzt wurden. Es zeigte sich, daß der Stern im Laufe eines Jahres eine regelmäßige kleine Bahn beschrieb, aber der Stern befand sich nie an demjenigen Punkt, wo er hätte sein müssen, wenn die Bewegung eine Parallaxe gewesen wäre.

Nachdem Molyneux 1728 gestorben war, setzte Bradley die Beobachtungen mit einem neuen Instrument fort, welches er bei seinem Oheim in Wanstead hatte aufstellen lassen. Er fand, daß auch andere Sterne im Laufe des Jahres ähnliche kleine Bahnen beschreiben. Die Ursache dieser Bewegungen mußte offenbar in der jährlichen Bewegung der Erde gesucht werden.

Fig. 274.



Die Aberration des Lichtes.

Da machte Bradley eines Tages während der Überfahrt über die Themse die Wahrnehmung, daß er, während das Boot in Bewegung war, den Wind von einer etwas anderen Richtung her empfand, als er wirklich kam. Diese Wahrnehmung soll für Bradley die Veranlassung gewesen sein, jene scheinbare Bewegung der Fixsterne durch einen ähnlichen Vorgang, die sogenannte Aberration des Lichtes, zu erklären. Er teilte seine Entdeckung 1728 dem damaligen Greenwicher Astronomen Edmund Halley mit, und dieser veröffentlichte den Brief Bradleys sofort in den Schriften der Gesellschaft der Wissenschaften. — Nach dem Tode Halleys, 1742, wurde Bradley dessen Nachfolger. Als solcher war er bis zu seinem Tode (1762) tätig.

Es sei 1, 2, 3, 4 (Fig. 274) die Erdbahn. Die Ebene der Erdbahn nach allen Seiten hin erweitert ist die Ekliptik. Ein Stern, der senkrecht über dieser Ebene, also am Pol der Ekliptik steht, beschreibt, wie Bradley fand, einen kleinen Kreis 1′ 2′ 3′ 4′ mit einem Durchmesser von 40″, was ungefähr dem 45. Teil des scheinbaren Sonnendurchmessers entspricht. Der Stern bewegt sich in seiner Bahn in derselben Richtung, wie die Erde in der ihrigen,

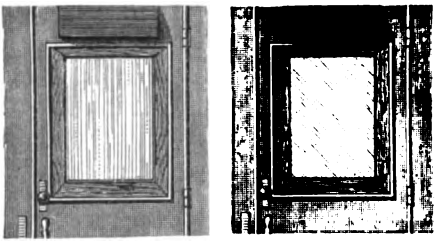
Digitized by Google

aber er ist merkwürdigerweise in seiner Bewegung der Erde um ein Vierteljahr voraus.

Ein Stern zwischen der Ekliptik und dem Pol der Ekliptik bewegt sich in einer elliptischen Bahn 1″ 2″ 3″ 4″, deren große Achse parallel zur Ekliptik und ebenfalls gleich 40″ ist, deren kleine Achse aber um so kleiner ist, je näher der Stern der Ekliptik steht. Ein Stern in der Ekliptik selbst geht auf einer geraden Linie in der Ekliptik 1‴ 2‴ 3‴ 4‴ hin und her.

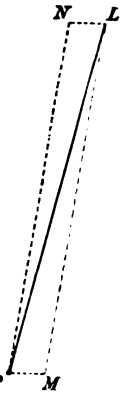
Bradleys Erklärung ging nun davon aus, daß hier zwei Bewegungen stattfinden, ähnlich als wenn senkrecht fallende Regentropfen das Fenster eines fahrenden Eisenbahnwagens treffen (Fig. 275). Das Licht schreitet fort, und die Erde schreitet ebenfalls fort. Die Richtung und die Geschwindigkeit eines

Fig. 275.



Spur der Regentropfen am Fenster eines Eisenbahnwagens.

Fig. 276.



Aberration des Lichtes.

Lichtstrahls sei durch die Linie LM (Fig. 276) angegeben. Die Erde bewege sich in derselben Zeit von P bis M. Dann ist die Wirkung dieselbe, als ob die Erde stillstände und der Lichtstrahl außer seiner eigenen Bewegung noch eine Bewegung hätte, die der Bewegung der Erde entgegengesetzt ist (LN). Die beiden Bewegungen LM und LN vereinigen sich aber zu der Bewegung LP (vergl. § 147). Wenn sich also die Erde in einer Richtung senkrecht zur Richtung des Lichtstrahls bewegt, so wird man den Lichtstrahl in einer solchen Richtung in das Auge oder das Fernrohr bekommen, als ob der Stern nach derjenigen Richtung hin verschoben wäre, in welcher sich die Erde gerade bewegt. Nur wenn sich die Erde in der Richtung des Strahls (2‴) oder in der entgegengesetzten Richtung (4‴) bewegt, erscheint der Stern da, wo er wirklich ist (ebenso wie die Richtung des Windes keine scheinbare Änderung erleidet, wenn man mit dem Winde oder gegen den Wind geht).

Diese Verschiebung, die Aberration, ist offenbar von der Entfernung der Sterne unabhängig. Sie ist allein bestimmt durch die Geschwindigkeit des Lichtes und die Geschwindigkeit der Erde. Wenn die Verschiebung am größten ist, so ist sie 20″ oder $^1/_{180}$ Grad, und da ein Grad ungefähr $^1/_{60}$ des Radius ist, so entsprechen 20″ ungefähr einer Bahnlänge von $^1/_{10000}$ des Radius. Mit anderen Worten, PM (Fig. 276) ist ungefähr $^1/_{10000}$ von LM, oder die

Digitized by Google

Geschwindigkeit des Lichtes LM ist ungefähr 10000 mal so groß als die Geschwindigkeit der Erde PM. Diese ist ungefähr 4 Meilen in der Sekunde. Also ist die Geschwindigkeit des Lichtes 40000 Meilen in der Sekunde. Dies Resultat bildet eine schöne Bestätigung der Entdeckung Römers und zugleich den ersten wirklichen Beweis für die Bewegung der Erde um die Sonne.

§ 285. Bradley hatte bereits 1727 eine andere Veränderlichkeit in der Stellung der Fixsterne erkannt, aber erst als er Königlicher Astronom in

Fig. 277.

Dominique François Arago.

Greenwich geworden war, konnte er die Erscheinung eingehender untersuchen und 1748 das Ergebnis seiner Beobachtungen veröffentlichen. Es zeigte sich nämlich, daß die Fixsterne auch eine kleine Bahn im Laufe von 18,6 Jahren beschrieben. Der Durchmesser dieser Bahn ist 14 bis 19″, und aus der Lage der Bahn zog Bradley den Schluß, daß die Erdachse außer dem großen Kreis, den sie im Laufe von 26000 Jahren um den Pol der Ekliptik beschreibt (§ 44), noch einen kleinen Kreis im Laufe von 18 Jahren beschreibt, daß sie also um den großen Kreis kleine cykloidenartige Schleifen beschreibt. Diese Bewegung erhielt den Namen Nutation.

Digitized by Google

§ 286. Der Anstoß für die dritte Messung der Lichtgeschwindigkeit, sowie der Grundgedanke für die Methode der Ausführung wurde von Dominique François Arago (Fig. 277) gegeben. Er war 1786 in Estagel bei Perpignan geboren und erhielt seine Ausbildung auf der Polytechnischen Schule in Paris. Im Jahre 1805 ging er nach Spanien, um dort mit Biot die Gradmessung bis Formentera fortzusetzen (§ 278). Während der Erhebung der Spanier gegen Napoleon wurde er in Haft genommen. Es gelang ihm, nach Algier zu entfliehen, doch wurde er auf der Reise nach Marseille wieder von einem spanischen Kreuzer gefangen genommen. Als er später freigelassen war und sich wieder Marseille näherte, wurde er durch einen Sturm nach Sardinien verschlagen. Von hier kam er wieder nach Algier, mußte hier als Dolmetscher dienen und wurde erst 1809 wieder freigelassen. Bald darauf wurde er Mitglied der Akademie und Lehrer an der Polytechnischen Schule. Zusammen mit dem Chemiker Gay-Lussac (1778 bis 1850) redigierte er die berühmten „Annales de physique et de chimie". Er veröffentlichte zahlreiche Schriften, teils Darstellungen allgemeiner Art aus dem Gebiete der Astronomie und Physik, teils Schilderungen großer Männer und deren Tätigkeit. Er stand in gleichem Ansehen als hervorragender Naturforscher und populärer Schriftsteller und Redner. Im Jahre 1830 wurde er Direktor der Pariser Sternwarte, und zahlreiche Ehrenbezeugungen wurden ihm von Städten und gelehrten Gesellschaften erwiesen. — Auch an der Politik nahm er tätigen Anteil. Als Mitglied der Deputiertenkammer vertrat er stets einen freiheitlichen Standpunkt und war für seine Gegner ein gefürchteter Redner. Er hat viel dazu beigetragen, daß während der Julirevolution 1830 dem Blutvergießen ein Ende gemacht wurde. Als die Regierung nach Dämpfung des Juniaufstandes 1832 damit umging, Paris mit detachierten Forts zu umgeben, wies Arago auf die große Gefahr hin, welche hierdurch für den Volksfrieden geschaffen werden würde, und die Regierung gab infolgedessen ihren Plan auf. Da wegen der Teilnahme der Polytechniker am Aufstand die Polytechnische Schule dem Kriegsministerium unterstellt werden sollte, legte Arago seine Professur nieder. — Während der Februarrevolution 1848 wurde er Mitglied der provisorischen Regierung und später des Exekutivkomitees. Er war gegen die Wahl Napoleons zum Präsidenten und scheute sich nicht, nach dem Staatsstreich das Wort zu Gunsten der Deportierten zu ergreifen. Er starb 1853. Da er in seinen letzten Lebensjahren fast blind war, konnte er seinen Plan, die Lichtgeschwindigkeit zu messen, nicht selbst zur Ausführung bringen. Dieser Plan wurde aber von Fizeau und Foucault in verschiedener Weise ausgeführt.

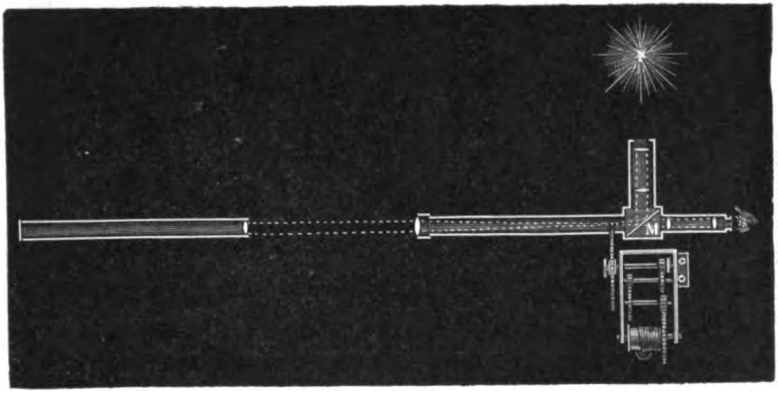
§ 287. Hippolyte Louis Fizeau, geb. 1819 in Paris, gest. 1896, ermittelte die Zeit, welche das Licht braucht, um den Weg von Suresne nach Montmartre (8633 m) und zurück zu durchlaufen. Die Strecke hatte also ziemlich dieselbe Länge wie die bei dem Versuch der Accademia del Cimento benutzte Strecke (§ 282). Allein Fizeau ordnete den Versuch so an, daß die Absendung und die Zurücksendung des Lichtes automatisch erfolgte, und zur

Digitized by Google

Ermittelung der Zeit diente eine höchst sinnreiche Vorrichtung, die mit dem Beobachtungsfernrohr in Verbindung stand.

Zur Ausführung des Versuches diente der in Fig. 278 abgebildete Apparat. Die rechte Seite der Figur stellt den in Suresne, die linke Seite den in Paris aufgestellten Teil des Apparates (von oben gesehen) vor. Der erstere Teil besteht aus einem Fernrohr, mit dem man nach Paris blicken kann. An dem Fernrohr ist ein Seitenrohr angebracht, durch welches die Strahlen einer kräftigen Lichtquelle in das Fernrohr eintreten. Hier fallen sie auf eine Glasplatte *M*, die zwar nicht mit Zinnamalgam belegt ist, aber

Fig. 278.



Fizeaus Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit.

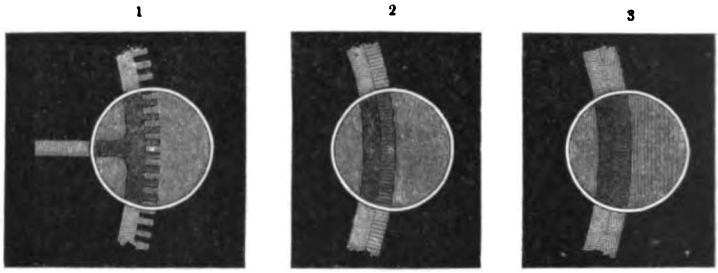
doch die Strahlen nach Paris hin reflektiert. Hier treten sie durch eine Sammellinse in ein Rohr ein, welches am anderen Ende durch einen auf der Achse des Rohres senkrecht stehenden Spiegel geschlossen ist. Bevor der Spiegel angebracht wurde, befand sich an seiner Stelle ein Okular, um das Rohr in die richtige Stellung bringen zu können. Die vom Spiegel zurückkommenden Strahlen werden, da der Spiegel im Brennpunkt der Linse steht, von dieser parallel gemacht, so daß sie ziemlich ungeschwächt nach Suresne zurückkommen. Hier treten sie in das Fernrohr ein und kommen in das Auge, ohne durch das Glas *M* eine erhebliche Schwächung erlitten zu haben. Man erblickt also im Fernrohr das Licht, welches man selbst angezündet hat. Auf der anderen Seite des Fernrohrs (in der Figur unten) befindet sich ein Uhrwerk mit einem schnell laufenden Zahnrad, welches durch einen Einschnitt in das Fernrohr eingreift, und zwar da, wo sich der gemeinsame Brennpunkt von Objekt und Okular befindet. Wenn man also in das Fernrohr hineinsieht, so erblickt man diese Zähne, und wenn das Rad stillsteht und die Mitte des Gesichtsfeldes von einer Zahnlücke eingenommen wird, so sieht man in diesem Zwischenraum das von Paris zurückkommende Licht (Fig. 279, 1, a. f. S.).

Setzt man nun das Uhrwerk in Gang, aber nicht zu schnell, so sind die Zähne nicht mehr einzeln sichtbar, aber man erblickt immer noch das Licht

Digitized by Google

(Fig. 279, 2). Das Licht, welches durch eine Zahnlücke ausgetreten ist, tritt durch dieselbe Zahnlücke wieder ein, wenn sich diese während der kurzen Zeit, die das Licht zur Reise braucht, nicht wesentlich verschoben hat. Wird aber nun der Gang des Uhrwerks beschleunigt, so kann man es erreichen, daß das Licht verschwindet. Dies tritt ein, wenn die Geschwindigkeit so groß geworden ist, daß das Licht, welches durch eine Lücke austritt, bei seiner Rückkehr auf einen Zahn trifft, so daß das Licht nicht weiter fortschreiten und in das Auge eintreten kann. Bei der doppelten Geschwindigkeit wird das Licht wieder

Fig. 279.



Fizeaus Zahnrad im Gesichtsfeld des Fernrohrs.

sichtbar, weil jetzt während der Zeit vom Austritt der Strahlen bis zur Rückkehr der reflektierten Strahlen an die Stelle der Zahnlücke, durch welche die Strahlen austraten, die nächstfolgende Zahnlücke getreten ist. Bei der dreifachen Geschwindigkeit verschwindet das Licht wieder, bei der vierfachen wird es wieder sichtbar u. s. w.

Bei den Versuchen von Fizeau verschwand das Licht zum erstenmal, wenn das Zahnrad 12,67 Umdrehungen in der Sekunde machte. Das Rad hatte 720 Zähne. Die Zeit, während der an die Stelle eines Zahnes die nächstfolgende Lücke trat, war also $^1/_2 \cdot {}^1/_{720} \cdot {}^1/_{12,67} = {}^1/_{18244}$ Sekunde. In dieser Zeit legt also das Licht 17 266 m zurück. Also legt es in einer Sekunde 18 244 . 17 266 m oder 315 000 km (ungefähr 4200 Meilen) zurück.

Im Jahr 1873 ist der Versuch von Cornu auf einer Strecke von 10 310 m mit mehreren Verbesserungen in den Messungen wiederholt worden. Er fand 298 500 km pro Sekunde. Im Jahr 1875 wurde der Versuch in der Nähe von Paris nochmals auf einer Linie von 23 000 m wiederholt, und man fand 300 400 km oder ungefähr 40 000 Meilen pro Sekunde.

§ 288. Die drei Bestimmungen der Lichtgeschwindigkeit von Römer, Bradley und Fizeau sind in der Idee, welche ihnen zu grunde liegt, und in der Art der Ausführung so verschieden voneinander, daß es wohl kaum jemanden geben wird, der die Richtigkeit der übereinstimmenden Resultate bezweifelt. Hierzu kommt nun noch eine Methode, die zugleich geeignet ist, die Geschwindigkeit des Lichtes im Wasser zu ermitteln. Arago hatte nämlich darauf hingewiesen, daß diese Geschwindigkeit von großer Bedeutung für die Frage nach der Natur des Lichtes ist. Die Messung wurde 1850 von Fizeau

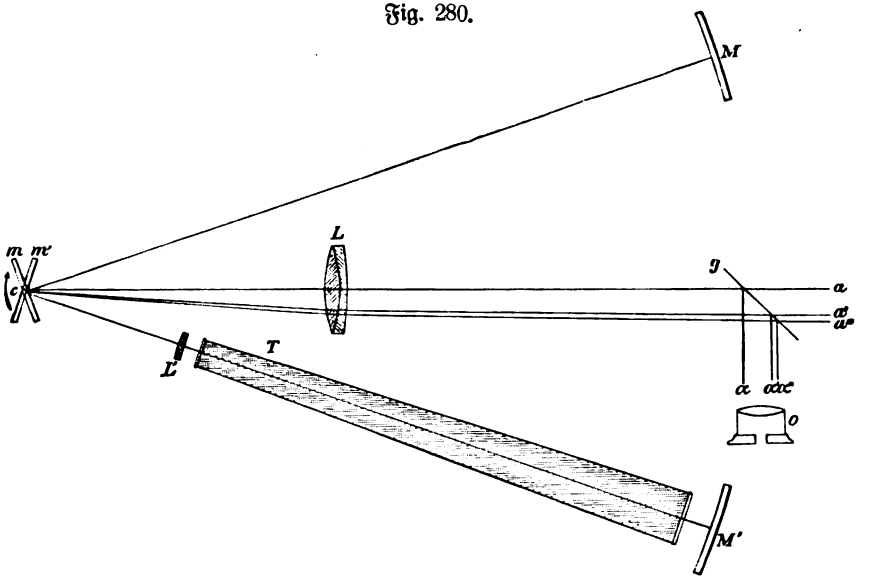
Digitized by Google

und Foucault ausgeführt. Der letztere wiederholte in den folgenden Jahren seine Messungen in etwas abgeänderter Weise.

Leon Foucault ist 1819 in Paris geboren. Er studierte Medizin, interessierte sich aber sehr für rein physikalische Fragen. Er hat viele schöne Arbeiten auf dem Gebiete der Optik ausgeführt, z. B. Hohlspiegel konstruiert und zur Herstellung von Fernröhren benutzt. Besonders berühmt ist er dadurch geworden, daß er einen Beweis für die Achsendrehung der Erde lieferte. Er starb 1868.

Sein Versuch zur Ermittelung der Lichtgeschwindigkeit wurde in einem Zimmer ausgeführt, so daß das Licht nur wenige Meter hin und her gesandt

Fig. 280.



Foucaults Messung der Lichtgeschwindigkeit in Luft und Wasser.

werden konnte. Das Licht geht von a (Fig. 280) durch die Glasplatte g und die Sammellinse L, die die Strahlen parallel macht, nach dem Spiegel m. Dieser dreht sich um eine vertikale Achse. In der Stellung m wirft er das Licht auf den Hohlspiegel M, dessen Zentrum in c liegt. Das Licht kommt also nach m zurück und geht von hier durch L zum Glase g. Von diesem wird es in der Richtung α durch das Fernrohr in das Auge reflektiert.

Wird der Spiegel m dagegen in die Stellung m' gebracht, so kommt das Licht durch das Rohr T zum Hohlspiegel M' und zurück nach m', von hier durch L nach g, so daß es ebenfalls in der Richtung α gesehen wird. Das Rohr T ist mit Wasser gefüllt und an beiden Enden durch Glasplatten geschlossen. Wenn das Licht durch das Wasser geht, erhält es einen blaugrünen Schimmer. Um jedoch das Licht, welches von M kommt, und das Licht, welches von M' kommt, noch besser unterscheiden zu können, wird M

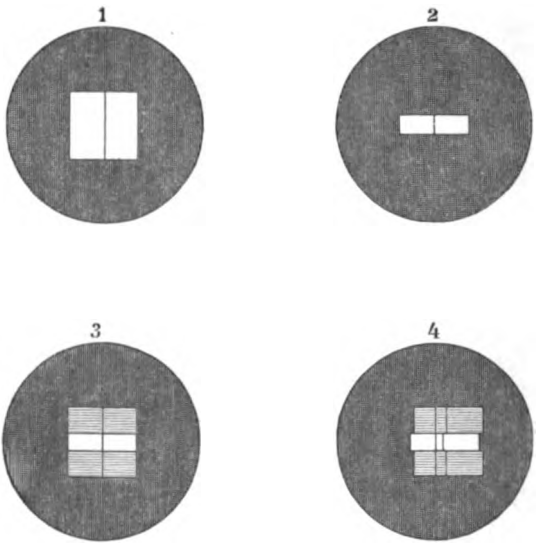
Digitized by Google

mit einer undurchsichtigen Platte bedeckt, die eine breite niedrige Öffnung hat, so daß man im Fernrohr *o* von dem Licht, welches von *M* kommt, den Eindruck Fig. 281, 1, dagegen von dem Licht, welches von *M'* kommt, den Eindruck Fig. 281, 2 bekommt.

Wird nun der Spiegel *m m'* mit mäßiger Geschwindigkeit gedreht, so wird er im allgemeinen das Licht nach anderen Richtungen als nach *M* und *M'* senden, aber auch nach diesen, so daß das Auge blitzartige Lichteindrücke erhält, die von *M* und *M'* herkommen. Wenn die Blitze einigermaßen schnell aufeinander folgen, so erhält man einen einzigen Eindruck, Fig. 281, 3.

Wird endlich der Spiegel in sehr schnelle Rotation versetzt, so werden beide Bilder nach rechts verschoben, aber am meisten dasjenige Bild, welches

Fig. 281.



Verschiebung des Lichtes infolge verschiedener Geschwindigkeit.

von *M'* stammt. Während der Lichtstrahl von *m* nach *M* und zurück nach *m* geht, hat sich dieser Spiegel ein wenig gedreht, und er wirft nun den Strahl nicht mehr in die Richtung *a*, sondern in die Richtung *a'*, infolgedessen das Bild in *α'* gesehen wird. Und während der Lichtstrahl von *m'* durch das Wasser nach *M'* und zurück nach *m'* geht, hat sich der Spiegel so viel gedreht, daß der Strahl in die Richtung *a''* geworfen und in *α''* gesehen wird. Der letztere Strahl hat also eine noch stärkere Verschiebung erlitten, als der erstere, Fig. 281, 4.

Der Strahl, welcher durch das Wasser geht, erleidet also offenbar eine noch größere Verzögerung, als der Strahl, welcher durch die Luft geht, und die Verschiebung kann gemessen werden, wenn auch die Wassersäule nur 4 m lang ist, so daß das Licht nur um $^1/_{116\,215\,000}$ Sekunde verzögert wird. Hier-

Digitized by Google

aus ergibt sich, daß die Geschwindigkeit des Lichtes in Wasser ungefähr $^3/_4$ der Geschwindigkeit in Luft, also gleich 30 000 Meilen in der Sekunde ist.

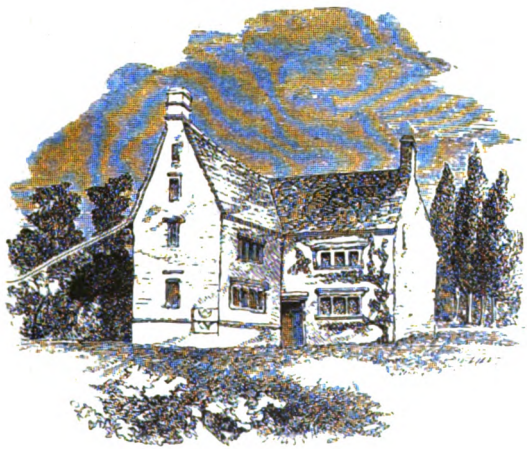
Für die Geschwindigkeit des Lichtes in der Luft fand Foucault den Wert 298 000 km. Neuere von Michelson (1878) und Newcomb ausgeführte Versuche ergaben für die Lichtgeschwindigkeit die Werte 299 850 km und 299 860 km.

Isaak Newton.

§ 289. Isaak Newton war am 5. Januar 1643 zu Woolsthorpe bei Grantham in Lincolnshire geboren. Sein Vater besaß ein kleines Landgut, welches schon über ein Jahrhundert im Besitz der Familie gewesen war und einen jährlichen Ertrag von 30 Pfund lieferte. Er war kurz nach seiner Vermählung gestorben, und der junge Newton, der nach seinem Vater den Taufnamen Isaak erhielt, war ein so schwächliches Kind, daß seine Lebensfähigkeit zweifelhaft erschien.

Seine Mutter, die als eine außerordentlich gute Frau geschildert wird, verheiratete sich nach einigen Jahren zum zweitenmal mit einem Geistlichen

Fig. 282.



Newtons Geburtshaus in Woolsthorpe.

namens Smith in North-Witham, ließ aber den Sohn in Woolsthorpe unter der Pflege ihrer Mutter zurück. Nach dem Tode ihres zweiten Gatten kehrte sie 1656 mit ihren drei Kindern aus der zweiten Ehe nach Woolsthorpe zurück und widmete sich der Erziehung ihrer Kinder und der Verwaltung ihrer beiden Besitzungen, die jährlich etwa 80 Pfund einbrachten (Fig. 282).

Digitized by Google

Isaak besuchte zuerst eine ziemlich dürftige Dorfschule, dann die Schule eines Herrn Stokes in Grantham. Er zeigte anfangs wenig Lust zum Lernen und machte schlechte Fortschritte. Später erwachte jedoch sein Ehrgeiz, und er wurde bald der erste in der Klasse.

Der schulmäßige Unterricht scheint ihm jedoch wenig zugesagt zu haben. Dagegen beschäftigte er sich gern mit naturwissenschaftlichen und mechanischen Dingen. Er verfertigte Wasseruhren, Wassermühlen, Windmühlen und Drachen, die er abends, nachdem er eine Laterne am Schweif befestigt hatte, zur Verwunderung der Bewohner über der Stadt kreisen ließ. Er studierte die Kraft des Windes, indem er — z. B. bei dem heftigen Sturm am Todestage Cromwells — beobachtete, wie weit er mit dem Winde und wie weit er gegen den Wind springen konnte. Auch verfertigte er Sonnenuhren, was ihm anfangs einige Schwierigkeit machte, bis es ihm klar wurde, wie sie eingerichtet sein müssen (§ 41). Eine solche Sonnenuhr brachte er an der Wand seines Geburtshauses an. Sie wurde später mit dem Stein, an dem sie befestigt war, vorsichtig von der Wand abgenommen und in der Bibliothek der Royal Society aufgestellt.

Derartige Dinge bildeten seine Lieblingsbeschäftigung, auch nachdem ihn seine Mutter aus der Schule genommen hatte, damit er ihr in der Verwaltung des Landgutes behilflich sein sollte. Allein für die Landwirtschaft hatte er kein Interesse. Auf den Rat des Bruders seiner Mutter, der Geistlicher war, wurde beschlossen, ihn wieder die Schule in Grantham besuchen zu lassen, damit er sich für das akademische Studium vorbereite. Er machte so gute Fortschritte, daß ihn Herr Stokes seinen Mitschülern als ein nachahmenswertes Vorbild hinstellte, als er im Alter von 18 Jahren die Schule verließ, um nach Cambridge überzusiedeln.

§ 290. Bei der etwas unregelmäßigen Vorbildung, welche Newton genossen hatte, darf man nicht denken, daß er beim Übergang auf die Universität in seinen Kenntnissen auf gleicher Höhe mit seinen Altersgenossen gestanden habe. Aber er kam vielleicht mit um so frischeren Kräften. Sein Biograph, der ausgezeichnete schottische Physiker Brewster, sagt in dieser Beziehung: „Nicht durch ein frühzeitiges beschleunigtes Wachstum erschöpft, sondern durch gesunde Ruhe gestärkt, war sein Geist um so besser geschickt, jene kräftigen Triebe hervorzubringen, die alsbald den fruchtbaren Erdboden mit Blättern und Früchten bedecken sollten." (Fig. 283.)

Newton legte sich namentlich auf das Studium der Mathematik, der Physik und der Philosophie. Aber auch hier ging er nicht schulgerecht zu Werke. Manches war ihm zu einfach, anderes wollte er besser wissen. Die Mathematik Euklids, dieses ehrwürdige Prachtexemplar sorgfältig geschulten Denkens, war ihm zu kindisch; es war ja fast alles selbstverständlich, und es war gar nicht nötig, es zu sagen, wenigstens nicht so umständlich. Dagegen fand er, daß in den mathematischen Werken Descartes' etwas enthalten sei, woran man sich den Kopf zerbrechen könne, und ohne die notwendigen Voraussetzungen arbeitete er sich mit seiner Energie durch diese

Digitized by Google

Werke hindurch. Ebenso studierte er, was Wallis (§ 178) über das Unendliche geschrieben hatte, und Keplers Optik. Erst später, als er eingesehen hatte, daß die schulgemäße Methode auch ihren Wert hat, daß sie namentlich geeignet ist, es allen — auch den Nichtgenies — zu ermöglichen, ja sie zu zwingen, dem Gang der Entwickelung zu folgen, bedauerte er, Euklid gering geschätzt zu haben, und machte selbst von dieser Methode Gebrauch, als er seine großen Entdeckungen der Menschheit übergab.

Fig. 283.

Newton als Jüngling.

Brewster schreibt ferner: „Cambridge wurde die wirkliche Geburtsstadt für Newtons Genie ... Innerhalb der Mauern dieser Stadt wurden alle seine Entdeckungen gemacht und durchgeführt.“ Dies ist an und für sich nicht sehr merkwürdig, da er hier bis 1703 blieb. Aber auffallend ist es, daß die drei Entdeckungen, die vorzugsweise die Größe Newtons begründet haben, wie es scheint, bereits 1666 oder vielleicht 1667 gemacht worden sind, als Newton 24 Jahre alt war.

Die erste ist rein mathematischer Natur. Auf diese gehen wir hier nicht näher ein. Es mag nur hervorgehoben werden, daß sie uns unter anderm in den Stand setzt, mit krummen Linien und deren Eigenschaften zu rechnen. Newton entwarf bereits im Jahre 1666 seine sogenannte Fluxionsrechnung, die später so wichtig gewordene Differential- und Integralrechnung, die gleichzeitig von Leibniz erfunden wurde. Abgesehen von der großen Bedeutung, welcher dieser Zweig der Wissenschaft an und für sich hat, wurde sie das unentbehrliche Werkzeug des Gedankens, welches Newton bei mehreren seiner physikalischen Entdeckungen brauchte.

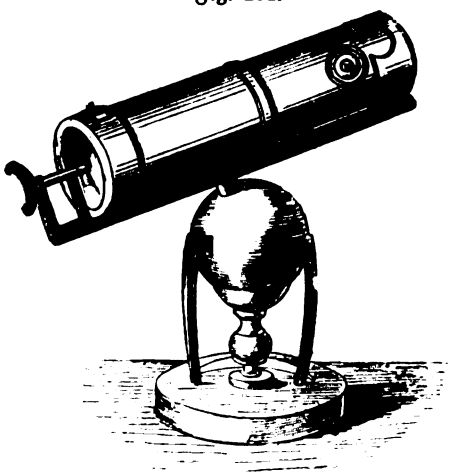
§ 291. Die zweite der drei großen Entdeckungen wird in einem späteren Abschnitt eingehender dargelegt werden. Aus ihr gewann Newton die Überzeugung, daß es unmöglich sei, Linsen zu verfertigen, die ein fehlerfreies Bild liefern. Man kann daher mit dem Fernrohr keine sehr starke Vergrößerung erreichen, ohne daß in dem Bilde verschwommene Farben auftreten. Newton erkannte, daß man diesen Fehler dadurch vermeiden kann, daß man die Bilder durch einen genau geschliffenen Hohlspiegel erzeugt. Er verlegte sich daher

Digitized by Google

selbst auf das Schleifen von Metallspiegeln, um diese zur Herstellung von Spiegelteleskopen zu benutzen. Ein solches war kurz vorher von James Gregory in Aberdeen (1638 bis 1675) vorgeschlagen worden. Auch er hatte versucht, den dazu erforderlichen Spiegel zu schleifen, da ihm dies jedoch nicht gelang, kam es nicht zur Zusammensetzung des Teleskops. Auch ein italienischer Jesuit, Nicola Zucchi (1586 bis 1670), und Robert Hooke (§ 166) waren mit dem Plan umgegangen, ein Spiegelteleskop anzufertigen, aber sie waren ebenfalls nicht zur Ausführung des Planes gekommen.

Newton verfertigte erst ein kleines und dann ein größeres Spiegelteleskop. — Namentlich das letztere erregte in Cambridge solches Aufsehen, daß die Königliche Gesellschaft der Wissenschaften (Royal Society) in London dasselbe kennen zu lernen wünschte. Newton sandte das Instrument nach London. Hier wurde es dem König vorgezeigt und von einer gelehrten Kommission untersucht, die sich sehr günstig über dasselbe aussprach, und der Sekretär der Gesellschaft, Oldenburg, erteilte Newton den Rat, Huygens in Paris eine Zeichnung und Beschreibung des Instrumentes zu senden. Das Instrument selbst schenkte Newton der Gesellschaft, und es befindet sich noch jetzt in der Bibliothek derselben mit der Inschrift: „Erfunden von Sir Isaak Newton und von seiner eigenen Hand verfertigt, 1671."

Fig. 284.



Newtons Spiegelteleskop.

Das Instrument ist in Fig. 284 abgebildet, und Fig. 285 zeigt die Einrichtung desselben. Der Hohlspiegel *S* würde ein wirkliches Bild des Gegenstandes bei *a* erzeugen (§ 91), wenn die Strahlen nicht von dem kleinen ebenen Spiegel *c* aufgehalten würden, welcher bewirkt, daß ein Bild bei *b* entsteht, welches in Bezug auf den Spiegel *c* symmetrisch mit *a* ist. Dieses Bild wird durch das Vergrößerungsglas *d* betrachtet.

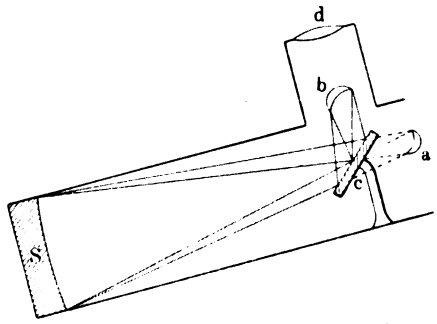
§ 292. In Cambridge hatte Newton bereits 1669 ein solches Ansehen erlangt, daß ihm der Lehrstuhl Barrows übertragen wurde, als dieser sich zurückzog, um ein kirchliches Amt zu übernehmen. Seit dieser Zeit hielt Newton an der Universität Vorlesungen über Optik. Auch durch sein Fernrohr gewann er Ansehen bei den Mitgliedern der Royal Society. Im Jahre 1672 wurde er selbst zum Mitgliede der Gesellschaft gewählt.

Diese Gesellschaft hatte in der ersten Zeit nach ihrer Stiftung im Jahre 1645 ein sehr bescheidenes Dasein gefristet, obwohl hervorragende Männer wie Boyle (§ 225), Hooke (§ 166) und Wren (§ 178) zu ihren Mit-

Digitized by Google

gliedern zählten. Ein Teil der Mitglieder siedelte 1647 nach Oxford über, und hier schloß sich Boyle der Gesellschaft an, die sich in dem Hause des Apothekers Croß, in dem auch Bayle wohnte, versammelte. Im Jahre 1659 siedelte man wieder nach London über, und im Jahre 1662 wurde die Gesellschaft von Karl II. zu einem Königlichen Institut erhoben. Sie bekam jedoch keine Staatsunterstützung und hat daher im Laufe der Zeit desto unabhängiger wirken können. Allerdings ist es wohl auch vorgekommen, daß bei der Wahl der Mitglieder mehr deren Wohlstand, als deren wissenschaftliche Leistungen maßgebend gewesen sind. Aber die Gesellschaft hat doch viele große Namen aufzuweisen, und ihre Schriften, die „Philosophical Transactions", die auch jetzt noch erscheinen, enthalten eine Menge höchst wertvoller, ja epochemachender Abhandlungen. Die Gesellschaft und ihre Schriften sind der Richtschnur treu geblieben, die Galilei und die Accademia del Cimento vorgezeichnet hatten und für die Francis Bacon (§ 167) eingetreten war. Versuche und Tatsachen sind immer bei ihr die Hauptsache gewesen, und wenn die Gedankenarbeit zuweilen, wie bei Newton, mehr in den Vordergrund trat, so handelte es sich nicht um zwecklose Spekulationen oder unsichere Hypothesen, sondern darum, die Tatsachen mit mathematischer Schärfe zu erklären.

Fig. 285.



Einrichtung von Newtons Spiegelteleskop.

Als Newton Mitglied der Gesellschaft geworden war, teilte er dieser sofort die erwähnte Entdeckung über die Farben mit, die nach seiner Ansicht eine der bedeutendsten Entdeckungen war, die jemals auf dem Gebiete der Naturwissenschaften gemacht worden waren.

Die Mitteilung wurde von der Gesellschaft günstig aufgenommen und veröffentlicht. Allein sie war eine lange Reihe von Jahren der Gegenstand zahlreicher Einwendungen, so daß Newton viel Zeit darauf verwenden mußte, seine Entdeckung zu verteidigen. Newton war über diese Kritik zuweilen so verstimmt, daß er es bedauerte, seine Entdeckung veröffentlicht und „seinen Frieden geopfert" zu haben. Diese Streitigkeiten hatten ohne Zweifel zur Folge, daß Newton in der Veröffentlichung späterer Arbeiten viel vorsichtiger wurde.

§ 293. Eingehender haben wir uns hier mit der dritten Entdeckung Newtons zu beschäftigen, deren Grundgedanke ebenfalls im Jahre 1666 bei ihm auftauchte, wenn er sich auch erst viel später vollständig entfaltete und klärte.

Was den Ursprung des Gedankens betrifft, so soll Newton in hohem Alter seiner Nichte die folgende Mitteilung gemacht haben. Voltaire, der sie berichtet, behauptet, sie von dieser Nichte erfahren zu haben.

Digitized by Google

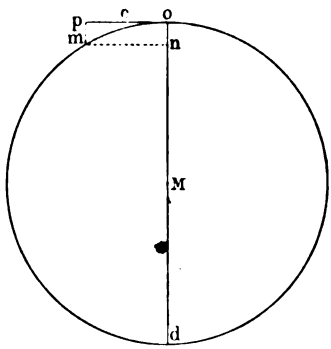
Im Jahre 1666 brachte Newton wegen der in Cambridge herrschenden Pest einige Zeit in seinem Geburtsort Woolsthorpe zu. Hier sah er eines Tages einen Apfel von einem Baum herabfallen, und dies veranlaßte ihn, sich zu fragen, ob die Kraft, die das Fallen des Apfels und überhaupt das Fallen der Körper auf der Erdoberfläche bewirkt, auch in größere Entfernung, ja bis in die Entfernung wirkt, wo sich der Mond befindet, so daß sie auf den Mond selbst wirken muß. Diese Kraft wirkt ja gleich stark auf alle möglichen Körper, so daß diese gleich schnell fallen (§ 139), und der Mond, der auch ein Körper ist, muß daher ebenso schnell fallen wie jeder andere, der sich an derselben Stelle befindet.

Fällt ein Körper in jener großen Entfernung ebenso schnell wie ein Körper dicht an der Erdoberfläche? Ist die Schwerkraft dort ebenso groß wie hier? Dies war, wie wir später sehen werden, eine Frage, die damals von verschiedenen Gelehrten erörtert wurde. Newton vermutete, daß die Kraft — ebenso wie die Wirkung einer Lichtquelle (§ 82) — so mit der Entfernung abnehmen müsse, daß sie in demselben Grade kleiner wird, wie die zweite Potenz (das Quadrat) der Entfernung größer wird.

Wenn sich dies so verhält, so kann man leicht berechnen, um wieviel der Mond in einer Sekunde nach der Erde hin fallen muß. An der Erdoberfläche fällt nämlich ein Körper 4,9 m (§ 149) in einer Sekunde, und da die Entfernung des Mondes vom Mittelpunkt der Erde gleich 60 Erdradien ist, so muß dieser $\frac{49}{60^2}$ oder 0,00136 m in der Sekunde fallen.

Die Geschwindigkeit c des Mondes (Fig. 286) läßt sich nun leicht berechnen, da man weiß, daß der Durchmesser der Mondbahn ungefähr gleich 100 000 Meilen ist und die Umlaufszeit des Mondes 27,5 Tage. Die Geschwindigkeit des Mondes ist daher 1000 m pro Sekunde.

Fig. 286.



Fall des Mondes gegen die Erde.

Mit dieser Geschwindigkeit würde der Mond nach dem Gesetz der Trägheit (§ 146) vom Punkt o seiner Bahn aus die Strecke $op = 1000$ m durchlaufen. Da er aber tatsächlich von o nach m kommt, wird er offenbar von der Richtung op um die Strecke $pm = on$ hinweggezogen. Ist nun wirklich diese Strecke gleich derjenigen, die der Mond in einer Sekunde nach der Erde hin fallen muß? Die Größe von on ist leicht zu berechnen (§ 173). Man erhält $on = \frac{om^2}{od} = 0{,}00135$, also tatsächlich die Zahl, welche man erwartet.

Die Bewegung des Mondes um die Erde erklärt sich also vollständig durch das Trägheitsgesetz und die Annahme, daß der Mond nach der Erde hin fällt, wie alle anderen Körper.

Digitized by Google

Die beiden Zahlen, welche Newton fand, stimmten allerdings nicht so vollkommen überein, sondern sie verhielten sich wie 31 zu 27. Er hatte nämlich bei seiner Berechnung einen weniger genauen Wert für die Größe der Erde und daher für die relative Entfernung des Mondes benutzt. Newton begnügte sich natürlich nicht mit einer so geringen Übereinstimmung zwischen den Tatsachen und den Ergebnissen der Spekulation. Er legte die Sache jedoch einstweilen beiseite und nahm nach dem Aufhören der Pest seine Arbeiten in der Optik wieder auf.

§ 294. Für die Entdeckung Newtons, zu der angeblich der fallende Apfel die äußere Veranlassung gegeben haben soll, waren selbstverständlich innere Voraussetzungen maßgebend, nämlich einerseits die geniale Beanlagung Newtons und anderseits die Bestrebungen, welche sich damals auf dem Gebiete der Naturwissenschaften geltend machten.

Newton hatte verschiedene Vorgänger gehabt. Descartes (§ 171), dessen Wirbeltheorie zur Zeit Newtons die wissenschaftliche Welt noch in hohem Grade beherrschte, gehört auf physikalischem Gebiet jedenfalls nicht zu diesen Vorgängern. Aber er hat ohne Zweifel als Mathematiker für Newton eine große Bedeutung gehabt.

Dagegen hatte Kepler nicht nur die Gesetze, nach denen sich die Himmelskörper bewegen, ausgesprochen (§ 73), sondern er hatte auch einen Versuch gemacht, diese Bewegungen zu erklären. Er sagt, wenn sich zwei Steine allein im Himmelsraum befänden, ohne von irgend einem Himmelskörper beeinflußt zu werden, so würden sie sich einander anziehen und schließlich zusammenstoßen. Er hält jedoch diesen Gedanken nicht fest, indem er die Bewegung der Planeten zu erklären versucht. Er ist allerdings davon überzeugt, daß zwischen der Sonne und den Planeten ein gewisses Band existiert, aber er nennt dieses Band eine magnetische Anziehung, und indem sich die Sonne um ihre Achse dreht, zieht sie vermittelst dieses Bandes die Planeten mit sich.

Ein hervorragender französischer Mathematiker, Pierre Fermat (1608 bis 1665), hatte nicht allein mathematische Arbeiten ausgeführt, durch die einige von den Aufgaben gelöst wurden, die später durch die Differentialrechnung eine mehr allgemeingültige Lösung fanden, sondern er hatte auch die Ansicht ausgesprochen, daß die Schwere die Folge der gegenseitigen Anziehung der Körper ist. Daher muß, so schloß er ganz richtig, die Schwere geringer werden, wenn man in die Erde eindringt. Denn dann wird ein Körper von demjenigen Teil der Erde, der sich nach dem Mittelpunkt hin befindet, nach innen gezogen, dagegen von demjenigen Teil, der sich nach der Oberfläche hin befindet, nach außen.

Endlich hat Borelli (vergl. II, § 17) im Jahre 1666 eine Theorie der Jupitertrabanten aufgestellt, und in dieser spricht er den Gedanken aus, daß die Bewegungen der Himmelskörper durch die gegenseitige Anziehung hervorgerufen und erhalten werden. Borelli war Physiker und er befand sich als

Digitized by Google

solcher auf dem richtigen Wege, aber er war nicht Mathematiker genug, um den Zusammenhang aufzuklären.

§ 295. Etwas ganz Ähnliches kann von Robert Hooke (§ 166) gesagt werden, der in dieser Hinsicht als der größte Vorläufer Newtons oder vielleicht richtiger als sein älterer Zeitgenosse bezeichnet werden muß, der an der Lösung der großen Aufgabe mitgearbeitet hat[1]).

In demselben Jahre, in welchem Borelli schrieb und Newton zuerst seine Gedanken auf die Wirkung der Schwerkraft lenkte (1666), veröffentlichte Hooke in den Mitteilungen der Gesellschaft eine Abhandlung, welche dieselbe Frage betraf.

Um zu untersuchen, ob die Schwere sich mit der Entfernung vom Mittelpunkt der Erde verändere, hatte Hooke auf der Spitze des Turmes der Pauls-kirche einen schweren Körper gewogen, einmal, während er unmittelbar über der Erdoberfläche schwebte und durch eine lange Schnur mit der Wagschale verbunden war, und einmal, während er samt der Schnur in der Wagschale lag. Er fand keinen Unterschied, auch nicht, als er die Wägung an der Erdoberfläche ausführte, während der Körper in einem 300 Fuß tiefen Schacht hing. Hooke nahm jedoch an, daß der Unterschied so gering sei, daß er durch solche Wägungen nicht nachgewiesen werden könne. Er schlug daher vor, Versuche mit der Pendeluhr zu machen (vergl. § 275). Es ist nicht bekannt, ob die Versuche zur Ausführung gekommen sind.

Einige Monate später sagt Hooke folgendes: „Es hat mich oft gewundert, warum die Planeten, die sich nach der Annahme von Kopernikus um die Sonne bewegen, ohne in eine feste Kugelschale eingeschlossen oder durch ein sichtbares Band mit der Sonne als Mittelpunkt verbunden zu sein, sich nicht weiter als bis auf einen gewissen Abstand von der Sonne entfernen und sich nicht auf gerader Linie fortbewegen, wie alle Körper, die nur durch einen einzelnen Stoß in Bewegung gesetzt werden. Die Biegung der Planetenbahnen von einer geraden zu einer krummen Linie kann nicht die Wirkung eines ersten einzelnen Stoßes sein, sondern sie muß auch noch eine andere wirkende Kraft als Ursache haben. Man kann sich zwei Arten von solchen Ursachen denken. Erstens kann ein Festhalten am Zentrum dadurch verursacht sein, daß der Äther in der Nähe der Sonne weniger dicht ist als in größerer Entfernung. Dies ist an und für sich nicht unwahrscheinlich, wenn der Äther der Luft gleicht, denn dann muß er infolge der Ausdehnung durch die Wärme in der Nähe der Sonne weniger dicht sein. Diese Annahme hat aber so viel gegen sich und entspricht unserem Thema so wenig, daß ich vorziehe, sie fallen zu lassen. Dann ist aber nur die Annahme möglich, daß die Biegung durch die Anziehungskraft eines Körpers verursacht wird, der sich im Zentrum der

[1]) Bei der Beurteilung der Verdienste dieses Mannes darf nicht verschwiegen werden, daß er im Verdacht steht, wiederholt fremde Entdeckungen, von denen er Kenntnis bekommen hatte, als seine eigenen ausgegeben zu haben.
Anm. d. Übers.

Digitized by Google

Bewegung befindet und den bewegten Körper beständig nach sich hin zieht. Diese Annahme macht es möglich, die Planetenbewegungen aus den gewöhnlichen Grundsätzen der Mechanik zu erklären, und sie bietet uns vielleicht ein Mittel, die Bewegungen der Himmelskörper mit Hilfe weniger Beobachtungen sehr genau zu berechnen."

Auf derartige Berechnungen läßt sich Hooke jedoch nicht ein, aber als Physiker macht er einen Versuch, der die Sache zum Teil veranschaulicht. Er hängt eine Kugel an einer Schnur auf, entfernt die Kugel etwas aus der Vertikallinie und gibt ihr einen seitlichen Stoß. Die Kugel bewegt sich dann um die Vertikallinie, und indem Hooke die Größe des seitlichen Stoßes ändert, kann er bewirken, daß die Kugel einen Kreis oder eine Ellipse beschreibt, deren Mittelpunkt in der Vertikallinie liegt. Hooke verkennt es nicht, daß der Versuch nur eine Veranschaulichung, nicht eine genaue Nachahmung der Planetenbewegung ist. Die Kraft, mit der die Kugel nach der Vertikallinie hingezogen wird, wird um so kleiner, je näher sie der Vertikallinie kommt, während z. B. die Anziehung, welche die Sonne auf die Erde ausübt, in der Nähe der Sonne größer werden muß. Die Bewegung eines Planeten, der einen Mond besitzt, veranschaulichte Hooke in der Weise, daß er an der großen Kugel vermittelst einer kürzeren Schnur eine kleinere aufhing und dann jede der beiden Kugeln durch einen Stoß in Bewegung setzte.

Acht Jahre später, 1674, machte Hooke der Gesellschaft eine neue Mitteilung über eine Bewegung des Sterns γ im Sternbild des Drachens (§ 284) und sodann über den folgenden, oft zu wenig beachteten Versuch, den Bau des Weltalls zu erklären.

„Ich werde jetzt ein Weltsystem aufstellen, das von jedem bis jetzt bekannten System in vielen Einzelheiten abweicht, das aber in jeder Hinsicht den gewöhnlichen Bewegungsgesetzen entspricht. Dieses beruht auf drei Annahmen, erstens, daß alle Himmelskörper eine Anziehung nach ihren Mittelpunkten hin ausüben, die nicht nur verhindert, daß die Teile der Körper selbst und die auf ihren Oberflächen befindlichen Gegenstände fortfliegen, sondern die sich auch auf die anderen Himmelskörper erstreckt, die innerhalb ihres Wirkungskreises liegen. So üben nicht nur die Sonne und der Mond einen Einfluß auf die Erde und deren Bewegung, und die Erde einen Einfluß auf die Sonne und den Mond aus, sondern ebenso üben auch Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn durch ihre Anziehung einen bedeutenden Einfluß auf die Bewegung der Erde in derselben Weise aus, wie eine entsprechende Anziehung der Erde einen bedeutenden Einfluß auf die Bewegungen der genannten Planeten ausübt. — Die zweite Annahme ist die, daß jeder beliebige Körper, der einmal eine geradlinige Bewegung besitzt, in dieser so lange beharrt, bis er durch eine wirkende Kraft abgelenkt und gezwungen wird, einen Kreis, eine Ellipse oder eine andere zusammengesetzte Linie zu beschreiben. — Die dritte Annahme ist die, daß die Anziehungskraft in ihrer Wirkung um so stärker wird, je näher der Körper, auf den sie wirkt, dem Mittelpunkt der Anziehung ist. Was das

Digitized by Google

Gesetz für diese Zunahme betrifft, so habe ich dasselbe noch nicht durch Versuche gefunden. Wenn es aber so bekannt wäre, wie es sein sollte, so würde es für die Astronomen ein ausgezeichnetes Hilfsmittel sein, alle Bewegungen der Himmelskörper auf ein Gesetz zurückzuführen, was ohne Kenntnis dieses Gesetzes nie möglich sein wird. Wer die kreisförmige Bewegung des Pendels versteht, wird diesen Grundgedanken als richtig anerkennen und leicht einsehen, in welcher Richtung man in der Natur suchen muß, um die richtige Auffassung zu finden.

Dies habe ich für den Augenblick nur für diejenigen andeuten wollen, welche die Fähigkeit und die Gelegenheit haben, die Untersuchung weiter zu verfolgen, und denen es für die Beobachtungen und Berechnungen nicht an Fleiß fehlt. Ich wünsche von Herzen, daß sich solche Persönlichkeiten finden werden, da ich selbst andere Dinge vorhabe, die erst zum Abschluß gebracht werden müssen."

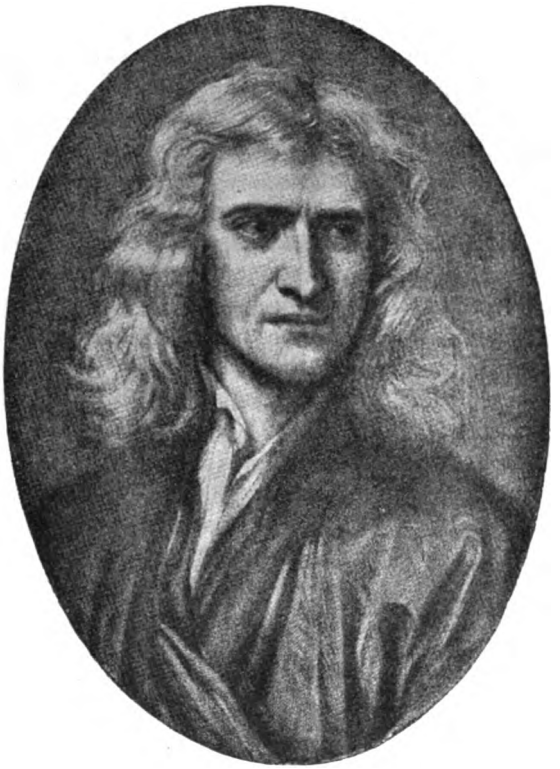
§ 296. Was Newton in diesen Jahren unternommen hat, um den Bau des Weltalls zu verstehen, wissen wir nicht. Während einer Reihe von Jahren nach 1666 war er sehr mit der Optik beschäftigt und wahrscheinlich auch mit der Differentialrechnung, die allerdings erst später veröffentlicht wurde, und seine Tätigkeit auf diesen Gebieten war, wie sich leicht denken läßt, eine so große, daß er sich zu gleicher Zeit nicht auch noch mit anderen Dingen eingehend beschäftigen konnte. Aber ganz scheinen die Arbeiten über den Bau des Weltalls nicht geruht zu haben, und er war vielleicht schon in den siebziger Jahren zu Resultaten gekommen, die das größte Aufsehen erregt haben würden, wenn sie veröffentlicht worden wären. Mit Rücksicht auf die unangenehmen Erfahrungen, welche er mit der Veröffentlichung seiner Optik gemacht hatte, machte er Niemandem eine Mitteilung über diese Arbeiten. Er lebte sehr zurückgezogen, hatte nur mit sehr wenigen Personen Umgang, ging selten vor 2 Uhr, oft erst um 4 oder 5 Uhr zu Bett und schlief nur wenige Stunden. Er versäumte die Mahlzeiten, und wenn er daran erinnert wurde, nahm er wohl, ohne sich in seiner Arbeit zu unterbrechen, einige Bissen und vergaß den Rest. Zuweilen wußte er nicht, ob er gegessen hatte oder nicht. Es kam vor, daß er seine Gäste verließ, um etwas zu holen, z. B. Wein, dann aber vollständig vergaß, weshalb er gegangen war, und hernach bei seiner Arbeit zu finden war.

Während er diese Lebensweise führte, erschien im Jahre 1679 zum erstenmal etwas von ihm über den Bau des Weltalls. Hooke, der inzwischen Sekretär der Gesellschaft der Wissenschaften geworden war, bat Newton um eine Abhandlung für die Schriften der Gesellschaft. Newton schrieb über eine neue Methode, die Achsendrehung der Erde zu beweisen, und machte den Vorschlag, die Gesellschaft möge den Versuch zur Ausführung bringen. Ein hoch gelegener Punkt, z. B. die Spitze eines Turmes, ist von der Erdachse weiter entfernt, als der Fuß des Turmes. Die Spitze beschreibt einen größeren Weg als der Fuß und hat daher eine größere Geschwindigkeit als dieser in der Richtung von Westen nach Osten. Da nun eine Kugel, die von der

Digitized by Google

Spitze des Turmes herabfällt, diese größere Geschwindigkeit nach Osten im Fallen beibehält, während der Fuß eine geringere Geschwindigkeit nach Osten hat, so muß die Kugel etwas östlich vom Fuße der Vertikallinie aufschlagen[1]). Die Gesellschaft beauftragte Hooke mit der Ausführung des Versuches. Hooke schrieb an Newton einen Brief, den er in einer späteren Versamm-

Fig. 287.



Newton nach einem Gemälde aus dem Jahre 1689.

lung vorlas. Hooke hatte eine Zeichnung in Newtons Abhandlung so aufgefaßt, als ob sie andeuten solle, daß die Bahn des fallenden Körpers spiralförmig sei, so daß sich der Körper, wenn er nicht durch die Erde aufgehalten würde, in einer derartigen Bahn nach dem Mittelpunkte der Erde hin bewegen würde. Dies ist ein reines Mißverständnis gewesen. Newton dachte gar nicht an einen Fall bis zum Mittelpunkt, sondern nur an einen

[1]) Tycho Brahe hatte eine ähnliche Idee gehabt. Da aber das Trägheitsgesetz damals noch nicht bekannt war, glaubte Tycho, ein Gegenstand, der von der Spitze eines Turmes herabfällt, müsse zurückbleiben, d. h. westlich vom Fußpunkt der Vertikallinie auffallen. Tycho fand keine Abweichung von der Vertikallinie und fühlte sich hierdurch in der Annahme bestärkt, daß sich die Erde nicht dreht.

Digitized by Google

Fall in der Nähe der Oberfläche der Erde, wo die Schwere überall im wesentlichen dieselbe ist. Nach Hookes Ansicht sollte der Körper, wenn er seine Bewegung fortsetzen könnte, eine lange Ellipse um den Mittelpunkt der Erde beschreiben, bis zur Spitze des Turmes zurückkehren und in dieser Bewegung beharren. — Die Gesellschaft der Wissenschaften war damit unzufrieden, daß kein Versuch gemacht worden war, und beauftragte Hooke von neuem, einen solchen auszuführen. Hooke tat dies, aber der Versuch führte zu keinem Resultat, da die Fallhöhe nur 27 Fuß betrug.

Die Versuche wurden später von Guglielmini in Bologna (1791), Benzenberg (1802) und Reich (1831) ausgeführt. Da die Fallhöhe bei den Versuchen des ersteren nur 90 Fuß betrug, fielen auch sie nicht sehr befriedigend aus. Dagegen führten die Versuche von Benzenberg, die in der Michaeliskirche in Hamburg ausgeführt wurden und bei denen die Fallhöhe 236 Fuß (76,3 m) betrug, zu einem entscheidenden Resultat, ebenso die von Reich im Dreibrüderschacht (158,5 m) bei Freiberg ausgeführten Versuche. Die Versuche müssen sehr sorgfältig ausgeführt werden, namentlich so, daß der Luftzug keinen störenden Einfluß ausübt. Ferner muß eine größere Anzahl von Versuchen ausgeführt und der Mittelwert aus den Resultaten der einzelnen Versuche gebildet werden. Benzenberg fand als Mittel von 31 Versuchen eine östliche Abweichung von 9 mm, Reich als Mittel von 106 Versuchen eine solche von 28,4 mm.

Newton verfolgte seine Idee nicht weiter, nachdem sie von Hooke eine so wenig sachgemäße Behandlung erfahren hatte. Um so eifriger widmete er sich seiner Arbeit, und als er 1682 seine Mondberechnung (§ 293) mit Zugrundelegung der nach Picards Gradmessung (§ 271) berichtigten Größe des Erddurchmessers erneuerte, fand er seine Idee von 1666 bestätigt. Seine Erregung soll bei dieser Gelegenheit so groß gewesen sein, daß er einen Freund bitten mußte, die Rechnung zu Ende zu führen. Jedenfalls war er in diesen Jahren über alle Beschreibung von der mathematischen Behandlung dieser Dinge in Anspruch genommen, was nicht zu verwundern ist, wenn man bedenkt, daß während dieser Zeit stiller Zurückgezogenheit in Cambridge das Werk entstand, welches als das bedeutendste bezeichnet werden kann, welches je auf dem Gebiete der Naturwissenschaften erschienen ist. — Bevor wir jedoch auf den Inhalt dieses Werkes näher eingehen, haben wir noch einen Blick auf gewisse Vorgänge in der Gesellschaft der Wissenschaften zu werfen.

§ 297. Zu den Mitgliedern der Gesellschaft gehörte damals der junge Edmund Halley, von dem später noch die Rede sein wird. Er sowohl, als auch Hooke und Wren hatten sich viel mit den Bahnen der Himmelskörper beschäftigt, und es war ihnen in dieser Hinsicht manches klar geworden. Sie kamen im Januar 1684 zusammen, und alsbald drehte sich die Unterhaltung um den Gegenstand, für den sie sich alle drei interessierten. Wenn ein kleiner Körper von einem großen so angezogen wird, daß die Größe der Anziehung dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional ist, so muß der kleine Körper, wenn er von vornherein eine seitliche Bewegung besitzt, eine

Digitized by Google

Ellipse beschreiben. Es fragt sich nun, wie sich dies mathematisch beweisen läßt. Wren versprach demjenigen der beiden anderen, der den Beweis zuerst finden würde, ein Buch im Wert von 40 Schilling. Hooke behauptete, er kenne den Beweis, aber er wolle ihn einstweilen nicht mitteilen, damit die anderen merken sollten, wie schwer er zu führen sei. Die Behauptung Hookes ist wohl schwerlich wahr gewesen, denn Wren hat später nie Gelegenheit gehabt, sein Versprechen einzulösen.

Halley kam sieben Monate später nach Cambridge und besuchte Newton in der Hoffnung, daß ihm dieser die Sache werde erklären können. Halley fand viel mehr, als er erwartete, denn Newton hatte ein großes Werk vollendet, in dem auch der gewünschte Beweis enthalten war; aber es hat fast den Anschein, als ob das Werk dazu bestimmt gewesen sei, bis nach dem Tode Newtons liegen zu bleiben, um zu vermeiden, daß sein Verfasser von Neuem in Streitigkeiten verwickelt werde. Halley erreichte es jedoch, daß ihm Newton versprach, das Werk der Gesellschaft der Wissenschaften vorzulegen, und Halley hat sich stets mit Vergnügen daran erinnert und es sich als ein Verdienst angerechnet, daß er dieses einzig dastehende Werk entdeckt und an die Öffentlichkeit gebracht hat. Es zog sich jedoch mit der Einsendung einige Jahre hin, aber als es endlich geschah, fand man das Werk so überwältigend, daß die Lobrede in der Gesellschaft mit den Worten schloß: „Alles ist fertig, es ist nichts mehr zu tun."

Hooke war wütend, daß er nicht in Newtons Werk genannt war, und er verlangte, daß dies geschehen sollte, denn die Grundgedanken des Werkes habe er lange vor Newton ausgesprochen, einige öffentlich, andere in Briefen an Newton. Als Newton hiervon Kenntnis erhielt, schrieb er einen Brief an Halley, in dem er seinem Ärger über Hooke Luft machte. Er schreibt, es sei dies das dritte Mal, daß er von Hooke verunglimpft werde. Die erste Verunglimpfung besteht natürlich in dem Verhalten Hookes gegenüber den Entdeckungen Newtons in der Optik (§ 292), die zweite in der „schulmeisterhaften Berichtigung" seiner Mitteilung über ein Verfahren, die Achsendrehung der Erde zu beweisen. Diese Berichtigung, sagt Newton, sei ganz widersinnig, da er sich über die Gestalt der Bahn im Inneren der Erde gar nicht ausgesprochen habe, sondern nur über den Fall auf der Erdoberfläche, wo die Schwere überall dieselbe ist; und nun komme Hooke und behaupte, er habe ihm brieflich mitgeteilt, daß die Schwerkraft dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional sei, etwas, was Hooke nicht zuerst gedacht oder ausgesprochen habe, und etwas, was Hooke und andere früher wohl hätten denken, aber nicht beweisen können, ja etwas, worüber sich Hooke in seinem Briefe an Newton sogar unrichtig geäußert habe, indem er dieses Gesetz auch im Inneren der Erde gelten lasse, wo es durchaus keine Gültigkeit habe. „Warum soll ich", fährt Newton fort, „einen Mann als Erfinder anerkennen, der seinen Anspruch auf einen Irrtum begründet und sich deshalb auf mich stürzt. Wenn ein Mensch, der sich für einen Gelehrten hält und dies zeigen will, zu Ihnen käme, wenn Sie beschäftigt sind,

Digitized by Google

und Sie trotz Ihrer Abweisung mit seinen Erfindungen plagte, Sie berichtigen wollte, während er selbst Fehler begeht, um hernach zu prahlen, daß er Sie zuerst über alles belehrt habe, und der schließlich behauptete, es sei ihm Unrecht geschehen, wenn Sie dies nicht annehmen, ich glaube, auch Sie würden ihn für einen Menschen von ziemlich unerträglichem Temperament halten ... Er hat nichts getan und schreibt dabei in einer Weise, als ob er alles wüßte und alles hinreichend angedeutet hätte. Nicht die einfachste Arbeit mit Berechnung und Beobachtung hat er angeführt, und dann entschuldigt er sich mit seinen Arbeiten, während er sich mit seinem Mangel an Fähigkeiten entschuldigen sollte ... Der Mathematiker, welcher alles aufklärt, muß sich damit begnügen, ein Rechenkünstler und einfacher Arbeiter zu sein, und ein Anderer, der nur Forderungen stellt und nach allem greift, nimmt alle Erfindungen für sich in Anspruch, diejenigen seiner Nachfolger ebenso wie diejenigen seiner Vorgänger."

Auf diesen scharfen Brief, von dem das Angeführte nur ein kleiner Auszug ist, antwortete Halley in milder und beschwichtigender Weise, was zur Folge hatte, daß Newton erklärte, Hookes Brief an ihn (1679), in dem vom Fall eines Körpers im Inneren der Erde die Rede ist, habe ihn doch veranlaßt, mehr über die elliptischen Bahnen der Planeten um die Sonne nachzudenken. Auch erklärte sich Newton bereit, bei einem der Sätze in seinem Werke die Worte „wie auch Wren, Hooke und Halley selbständig gefunden haben" einzufügen.

Aus alle diesem geht hervor, daß das Werk Newtons durch den Strom der Zeit hervorgebracht wurde, und man sagt wohl, wie in vielen anderen ähnlichen Fällen, daß, wenn Newton nicht gelebt hätte, doch ein ähnliches Werk von einem anderen Verfasser erschienen sein würde. Aber in diesem Falle muß doch hinzugefügt werden, daß Newton mit seiner einzig dastehenden Geisteskraft alles auf einmal wie durch einen Zauberschlag aufklärte, was andernfalls auch, aber erst im Laufe längerer Zeit und unter Mitwirkung zahlreicher Forscher, nach und nach aufgeklärt worden sein würde. — Dem Gedankenfluge Newtons in seinen „Prinzipien" zu folgen, ist nicht jedermanns Sache. Wir wollen uns daher darauf beschränken, einige Hauptpunkte aus dem Inhalte dieses unsterblichen Werkes hervorzuheben.

§ 298. Als wir in § 293 durch Rechnung bestätigt fanden, daß die Bewegung des Mondes um die Erde eine einfache Folge des Trägheitsgesetzes und der Schwere ist, setzten wir der Einfachheit halber voraus, daß die Mondbahn ein Kreis sei, in dessen Mittelpunkt die Erde steht. Dies ist nicht ganz richtig. Der Mond bewegt sich ebenso wie die Planeten um die Sonne in einer Ellipse. Will man also vollkommen zuverlässige Schlüsse ziehen, so muß man von den Bewegungen ausgehen, wie sie tatsächlich sind und wie sie von Kepler in seinen drei Gesetzen (§ 73) ausgesprochen wurden. Newton zieht nun aus diesen drei Gesetzen mit mathematischer Strenge drei Folgerungen. Kurz ausgedrückt lauten die Keplerschen Gesetze und Newtons Folgerungen so:

Digitized by Google

Erstes Gesetz: Die Planetenbahn ist eine Ellipse mit der Sonne im Mittelpunkt.

Folgerung: Die Anziehung ist dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional.

Zweites Gesetz: Der Radius vector beschreibt in gleichen Zeiten gleiche Flächen (Sektoren).

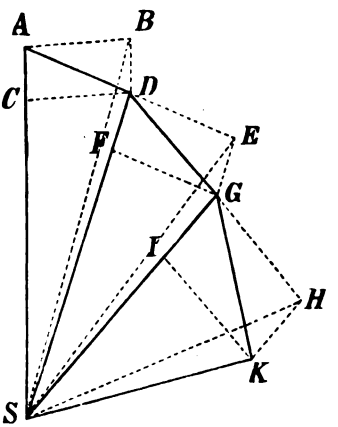
Folgerung: Auf den Planeten wirkt eine Anziehungskraft, die ihren Sitz in der Sonne hat.

Drittes Gesetz: Die dritten Potenzen der mittleren Entfernungen der Planeten verhalten sich wie die zweiten Potenzen der Umlaufszeiten.

Folgerung: Es ist dieselbe Anziehungskraft, die auf alle Planeten wirkt.

Newton beweist nun als gewandter Mathematiker die Sätze vorwärts und rückwärts. Geht man von den Gesetzen aus, so ergeben sich aus diesen die Folgerungen. Geht man dagegen von den letzteren aus, so ergeben sich die ersteren. Wir wollen dies etwas näher betrachten.

Fig. 288.



Wirkung einer Zentralkraft.

§ 299. Es sei S (Fig. 288) die Sonne, A ein Planet mit einer Geschwindigkeit von solcher Richtung und Größe, daß er in der Zeiteinheit nach B kommen würde, wenn keine Kraft auf ihn einwirkte. Nun setzen wir aber voraus, daß eine Kraft auf ihn einwirkt, die ihn nach der Sonne hintreiben würde, etwa so, daß er in der Zeiteinheit den Punkt C auf der Linie AS erreichen würde. Dann wird der Planet in der Zeiteinheit nach D kommen (§ 147). Nun würde der Planet infolge der Trägheit in der folgenden Zeiteinheit einen Weg DE zurücklegen, der dieselbe Größe und dieselbe Richtung hat wie AD. Da er aber zugleich von D nach F gezogen wird, kommt er in den Punkt G. Am Ende der dritten Zeiteinheit kommt er im Punkt K an, u. s. w. Nun ist, wie leicht einzusehen ist,

$$\triangle ADS = \triangle DES,$$
$$\triangle DES = \triangle DGS,$$
$$\triangle DGS = \triangle GHS,$$
$$\triangle GHS = \triangle GKS.$$

Also sind die Dreiecke, welche der Radius vector in gleichen Zeiten beschreibt, gleich groß, nämlich $ADS = DGS = GKS$. Läßt man die Zeitteilchen in Gedanken unendlich klein werden, so wird die Bahn $ADGK$ eine krumme Linie, und das zweite Keplersche Gesetz ist hiermit bewiesen (Fig. 57). —

Digitized by Google

Die umgekehrte Reihe von Schlüssen führt zu dem Resultat, daß die Kraft, die auf die Planeten wirkt, ihren Sitz in der Sonne hat.

§ 300. Da das Verständnis der Bewegung in elliptischen Bahnen mathematische Kenntnisse erfordert, die hier nicht vorausgesetzt werden können, müssen wir uns mit der Bemerkung begnügen, daß das erste Keplersche Gesetz ebenso sicher zu dem Schluß führt, daß die Kraft in demselben Grade kleiner sein muß, in welchem die zweite Potenz der Entfernung größer ist.

Nur bezüglich eines Punktes wollen wir eine kontrollierende Rechnung versuchen. Die Ellipse ist symmetrisch in Bezug auf beide Achsen, die kleine und die große. Die Bahn hat also dieselbe Krümmung, wenn der Planet der Sonne am nächsten, seine Geschwindigkeit also am größten ist, und wenn er von der Sonne am weitesten entfernt, seine Geschwindigkeit also am kleinsten ist. Diese Gleichheit der Krümmung läßt sich leicht durch elementare Rechnung beweisen.

Es sei in der Sonnennähe (Perihel) der Krümmungsradius r, die Geschwindigkeit v, die Zentrifugalkraft und also die Anziehung, die ihr das Gleichgewicht hält, f. Dann ist (§ 173)

$$f = \frac{v^2}{r}.$$

Ebenso ist in der Sonnenferne (Aphel)

$$F = \frac{V^2}{R}.$$

Aus diesen beiden Gleichungen folgt:

$$\frac{f}{F} = \frac{v^2}{V^2} \cdot \frac{R}{r}.$$

Nennt man nun die Entfernung der Sonne im Perihel a und im Aphel A, so sind nach dem zweiten Keplerschen Gesetze die beiden Dreiecke, deren Grundlinien v und V, und deren Höhen a und A sind, gleich, also:

$$a \,.\, v = A \,.\, V \quad \text{oder} \quad \frac{v}{V} = \frac{A}{a}.$$

Ersetzt man also in der vorhergehenden Gleichung $\frac{v^2}{V^2}$ durch $\frac{A^2}{a^2}$, so erhält man

$$\frac{f}{F} = \frac{A^2}{a^2} \cdot \frac{R}{r}.$$

Macht man nun die Newtonsche Annahme über Entfernung und Anziehung, nämlich

$$\frac{f}{F} = \frac{A^2}{a^2},$$

so ergibt sich, daß $R/r = 1$ oder $R = r$, d. h. die Krümmungen im Perihel und im Aphel sind gleich groß. — Geht man dagegen vom ersten Kepler-

Digitized by Google

schen Gesetze aus, nämlich daß die Bahn eine Ellipse ist, so sind die beiden Krümmungsradien gleich groß. Wenn aber $R = r$, dann geht die Gleichung

$$\frac{f}{F} = \frac{A^2}{a^2} \cdot \frac{R}{r}$$

in

$$\frac{f}{F} = \frac{A^2}{a^2}$$

über, d. h. Newtons Annahme über die Abhängigkeit der Anziehung von der Entfernung ist richtig.

Das Gesetz, nach welchem sich die Wirkung der Schwerkraft mit der Entfernung ändert, hat Ähnlichkeit mit dem Gesetz über die Abnahme der Helligkeit mit der Entfernung von der Lichtquelle (§ 82). Indessen darf das Gesetz nicht ohne weiteres als etwas Selbstverständliches angesehen werden. Aus der Gültigkeit des Gesetzes kann man jedoch den Schluß ziehen, daß im Weltraume nichts vorhanden ist, was die Anziehungskraft so zu sagen schwächt oder verzehrt, auch nichts, was die Planeten in ihrer Bewegung hindert.

§ 301. Endlich wollen wir die Wirkungen vergleichen, welche die Anziehungskraft der Sonne auf verschiedene Planeten ausübt. Die Entfernung der Erde vom Mittelpunkt der Sonne sei r (z. B. in Sonnenradien ausgedrückt) und die Umlaufszeit (ein Jahr) sei t. Dann ist die Zentrifugalkraft, welche die Erde von der Sonne entfernen würde, $\frac{4\pi^2 r}{t^2}$ (§ 174). Nennt man die Anziehungskraft, welche die Sonne auf die Erde ausüben würde, wenn sich diese auf der Oberfläche der Sonne befände, k, so ist die Anziehung in der wirklichen Entfernung der Erde $\frac{k}{r^2}$. Da sich nun die Erde nicht nach der Sonne hinbewegt und nicht von der Sonne entfernt, müssen diese beiden Kräfte gleich sein:

$$\frac{k}{r^2} = \frac{4\pi^2 r}{t^2} \quad \text{oder} \quad k = \frac{4\pi^2 r^3}{t^2}.$$

Wenn für einen anderen Planeten die betreffenden Größen mit K, R und T bezeichnet werden, so ist

$$K = \frac{4\pi^2 R^3}{T^2}.$$

Nach dem dritten Keplerschen Gesetze ist aber

$$\frac{r^3}{t^2} = \frac{R^3}{T^2}, \text{ also auch } \frac{4\pi^2 v^3}{t^2} = \frac{4\pi^2 R^3}{T^2},$$

d. h. $k = K$. Die Erde und die übrigen Planeten würden also an der Oberfläche der Sonne derselben Anziehungskraft ausgesetzt sein. Dies Gesetz entspricht genau dem Gesetze, daß an der Erdoberfläche alle Körper gleich schnell fallen, einerlei ob sie schwer oder leicht, groß oder klein sind (§ 139). Die Anziehungskraft, mit der die Sonne auf die Pla-

Digitized by Google

neten wirkt, hängt also nicht von der Beschaffenheit und Größe, sondern nur von der Entfernung der Planeten ab.

§ 302. Es hatte sich nun herausgestellt, daß das dritte Keplersche Gesetz auch für die Trabanten der Planeten gilt, z. B. für die Umlaufszeiten der Jupitermonde und ihre Entfernung vom Jupiter. Hieraus folgt, daß auch dieser Planet auf alle seine Monde mit derselben Kraft wirkt, und Newton zog jetzt den Schluß, daß diese Anziehungen nicht magnetischer oder ähnlicher Art sind, sondern daß sie allein durch die Masse der Himmelskörper bedingt werden, ja daß die Anziehung eine allgemeine Eigenschaft der Materie ist und daß die Menge der Materie durch die Größe der Anziehung gemessen werden kann. Zur Erläuterung mögen einige Beispiele dienen. Der Einfachheit halber wollen wir aber nur mit abgerundeten Zahlen rechnen.

Setzt man die Entfernung des Mondes von der Erde gleich 1, so ist die Entfernung der Erde von der Sonne ungefähr 400 (§ 33). Die Zentrifugalkraft, welche auf die Erde in ihrer Bahn um die Sonne wirkt und die durch die Anziehungskraft der Sonne aufgehoben wird, kann also durch die Formel $\frac{4\pi^2 . 400}{365^2}$ ausgedrückt werden (§ 174), wenn wir den Tag als Zeiteinheit benutzen. Die Anziehungskraft, welche die Erde auf den Mond ausübt und die gleich der Zentrifugalkraft des Mondes in seiner Bahn ist, wird durch die Formel $\frac{4\pi^2 . 1}{27^2}$ ausgedrückt. Wäre nun der Mond ebenso weit entfernt wie die Sonne, so würde die Anziehung der Erde auf ihn

$$\frac{4\pi^2 . 1}{27^2} \cdot \frac{1}{400^2}$$

sein. Also verhält sich die Anziehungskraft der Sonne zur Anziehungskraft der Erde wie

$$\frac{4\pi^2 . 400}{365^2} : \frac{4\pi^2 . 1}{27^2 . 400^2} = \frac{400^3 . 27^2}{365^2}.$$

Rechnet man den Ausdruck mit etwas weniger abgerundeten Zahlen aus, so erhält man ungefähr 320 000. Die Anziehungskraft der Sonne ist 320 000 mal so groß als die Anziehungskraft der Erde.

Wenn man die Anziehungskraft der Erde mit der des Jupiter vergleichen will, so kann man den äußersten Jupitermond benutzen. Er ist ungefähr fünfmal soweit vom Jupiter entfernt als der Mond von der Erde und seine Umlaufszeit ist ungefähr 17 Tage. Seine Zentrifugalkraft und also die Anziehung des Jupiter ist $\frac{4\pi^2 . 5}{17^2}$, und wenn der Erdmond ebenso weit von der Erde entfernt wäre wie der Jupitermond vom Jupiter, so würde seine Anziehung $\frac{4\pi . 1}{27^2} \cdot \frac{1}{5^2}$ sein. Die Anziehungskräfte des Jupiter und der Erde verhalten sich also wie

Digitized by Google

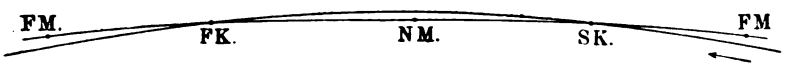
$$\frac{4\pi^2 . 5}{17^2} : \frac{4\pi^2 . 1}{27^2 . 5^2} = \frac{5^3 . 27^2}{17^2}.$$

Die Anziehung des Jupiter ist also ungefähr 310mal so groß, als die Anziehung der Erde aus derselben Entfernung.

Die Anziehung, welche die Sonne auf den Mond ausübt, ist im Durchschnitt dieselbe, die sie auf die Erde ausübt, nämlich $\frac{4\pi^2 . 400}{365^2}$, ein wenig größer oder kleiner, je nachdem der Mond auf der der Sonne zugewendeten oder auf der von der Sonne abgewendeten Seite der Erde steht. Vergleicht man diese Anziehung der Sonne mit derjenigen, die die Erde auf den Mond ausübt, nämlich $\frac{4\pi^2 . 1}{27^2}$, so erkennt man leicht, daß die Anziehung, die die Sonne auf den Mond ausübt, $\left(\frac{4\pi^2}{333}\right)$, stärker ist, als die Anziehung, die die Erde auf den Mond ausübt, $\left(\frac{4\pi^2}{729}\right)$. Hieraus folgt, daß nicht nur die Erdbahn, sondern auch die Mondbahn ihre hohle (konkave) Seite der Sonne zuwendet, und zwar so, daß die Krümmung zur Zeit des Vollmondes am stärksten (Fig. 289, *FM*) und zur Zeit des Neumondes (*NM*) am geringsten ist, da im ersteren Falle Sonne und Erde nach derselben Richtung, im letzteren Falle dagegen nach entgegengesetzter Richtung wirken.

§ 303. Indem Newton so die Größe der Anziehungskraft der verschiedenen Himmelskörper berechnete, und indem er in dieser eine allgemeine Eigenschaft der Materie erblickte, fand er sozusagen die Stoffmenge oder die Masse der einzelnen Himmelskörper. Die Anziehung der Erde oder die Schwere ist die aus den Erfahrungen des täglichen Lebens bekannteste Äußerung dieser Anziehungen. Da nun die Anziehung eine allgemeine Eigenschaft der Körper ist, so daß jeder Körper von jedem anderen der Masse des

Fig. 289.



Bahnen der Erde und des Mondes um die Sonne.

letzteren entsprechend angezogen wird und er selbst den anderen seiner eigenen Masse entsprechend anzieht, so ist die Kraft — Druck oder Zug —, welche die Anziehung hervorbringt, sowohl der Masse des einen, als auch der Masse des anderen Körpers, folglich dem Produkt der Massen beider Körper proportional. Da nun die Masse und folglich die Anziehung der Erde für alle Körper auf der Erdoberfläche dieselbe ist, so hängt die Kraft, mit der diese nach der Erde hingezogen werden oder das Gewicht derselben nur von ihrer eigenen Masse ab, d. h. ihr Gewicht ist ihrer Masse proportional.

Denkt man sich nun, die Sonne, die Planeten und ihre Monde würden nach einem vielmal größeren Himmelskörper gebracht und auf die Oberfläche

Digitized by Google

derselben nebeneinander gelegt, so würden auch hier ihre Gewichte der Masse proportional sein, und da Newton in der angegebenen Weise die Massen berechnet hat, liegt das Bild sehr nahe, welches man an der Gedenktafel in der Westminsterabtei erblickt, nämlich Engel, die damit beschäftigt sind, die Himmelskörper auf der Wagschale zu wiegen.

§ 304. Nachdem man so das Verhältnis der Massen der Himmelskörper ermittelt hatte, mußte von einem derselben, z. B. von der Erde, der absolute Wert der Masse ermittelt werden. Da man das Volumen der Erde kennt, handelt es sich also im wesentlichen um die Ermittelung der Dichtigkeit der Erde. Vom Gewicht der Erde zu reden, klingt etwas sonderbar. Denn wenn wir vom Gewichte eines Gegenstandes sprechen, so meinen wir damit die Kraft, mit der er von der Erde angezogen wird. Man kann sich allerdings vorstellen, man habe die Erde in eine große Anzahl kleiner Teile zerlegt, jeden dieser Teile gewogen, wieder an seine Stelle gebracht und schließlich die sämtlichen Gewichte der einzelnen Teile addiert. — Man hat später, wie wir jetzt sehen werden, die Masse der Erde sehr genau ermittelt und damit zugleich das allgemeine Anziehungsgesetz bestätigt gefunden.

§ 305. Die ältesten Versuche, die Masse der Erde zu ermitteln, bestanden darin, daß man die Masse der Erde mit der Masse eines Berges verglich. Ein Berg, dessen Masse im Vergleich zur Masse der Erde allerdings gering, aber im Vergleich zur Masse anderer Gegenstände groß ist, muß auf jeden Körper in seiner Nähe eine merkliche Anziehung ausüben. Die ersten Versuche wurden von Bouguer und Condamine während ihres Aufenthaltes in Südamerika (§ 278) ausgeführt.

Wenn man sich von der Erde entfernt, also über den Meeresspiegel erhebt, so nimmt die Schwere in demselben Verhältnis ab, in welchem das Quadrat der Entfernung vom Mittelpunkt zunimmt. Die Schwere muß also auf der Spitze eines hohen Berges in einem Verhältnis kleiner werden, welches leicht zu berechnen ist, wenn man die Höhe des Berges kennt. Da nun der Berg selbst eine Masse hat, so wird diese, die überdies dem Beobachter auf der Spitze des Berges näher ist, als der Mittelpunkt der Erde, mitwirken, den Körper auf der Spitze nach unten zu ziehen. Daher ist die Schwere etwas größer, als sie nach der Berechnung sein sollte. Die Größe der Schwere ermittelten Bouguer und Condamine mit Hilfe einer Pendeluhr (vergl. § 275), und das Ergebnis der Rechnung war, daß die Erde 4,5 mal so dicht als die Bergkette der Cordilleren ist.

Dieselben Physiker haben noch in einer anderen Weise versucht, die Masse der Erde mit der Masse eines Berges zu vergleichen. Ein Körper am Fuße des Berges ist natürlich der allgemeinen Anziehung der Erde unterworfen, die nach dem Mittelpunkte der Erde gerichtet ist, aber der Berg wirkt auch ein wenig, und zwar in horizontaler Richtung. Die beiden Kräfte erzeugen daher als Resultante eine Kraft, die nicht genau nach dem Mittelpunkte der Erde gerichtet ist, sondern von dieser Richtung etwas nach dem Berge hin abweicht. Bouguer und Condamine ermittelten die Abweichung

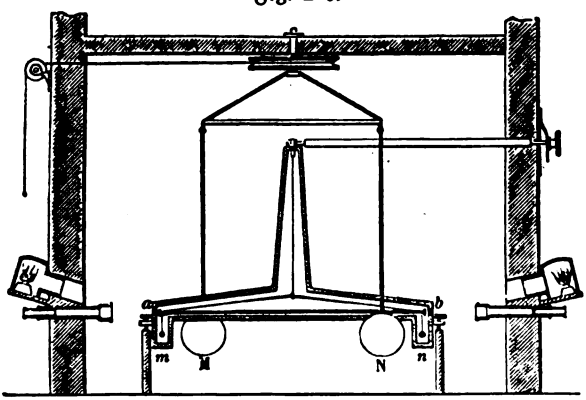
Digitized by Google

des Bleilotes von der Vertikalen am Chimborazo und berechneten hieraus das Verhältnis der Massen der Erde und des Berges. Sie fanden aber für die Masse des Berges einen so geringen Wert, daß sie annehmen zu müssen glaubten, derselbe enthalte im Inneren vulkanische Hohlräume.

Die Idee war gut, nicht aber die Ausführung. Mit besserem Erfolge wurde ein derartiger Versuch 1774 von Maskelyne am Berge Schehallien in Schottland ausgeführt. Zwei Punkte, von denen der eine nördlich und der andere südlich von dem genannten Berge lag, hatten eine (durch geodätische Messungen ermittelte) Entfernung von 1330 m. Die Differenz der (durch Messung der Polhöhen ermittelten) geographischen Breiten, also der Winkel, den die Lotlinien an beiden Orten miteinander bilden, war gleich 54,6 Sekunden, während einem Bogen von 1330 m nur ein Winkel von 43 Sekunden entspricht. Die Abweichung des Bleilotes von der Vertikallinie betrug also 5,6″. Dachte man sich nun die Masse des Berges im Schwerpunkt des Berges und die Masse der Erde im Mittelpunkt vereinigt, so ergab sich, daß die Dichtigkeit der Erde 1,8 mal so groß als die Dichtigkeit des Berges sein mußte. Da die letztere gleich 2,61 angenommen wurde, ergab sich für die letztere der Wert 4,7.

§ 306. Ein anderes Verfahren, welches zu einem sehr zuverlässigen Resultate geführt hat, wurde von John Mitchell angegeben. Dieser starb jedoch, ohne die Versuche ausgeführt zu haben. Sie wurden aber nach seinem Tode von dem berühmten englischen Chemiker Henry Cavendish (1731 bis 1810) ausgeführt. Das Ergebnis seiner Versuche veröffentlichte er im Jahre 1798.

Fig. 290.



Cavendishs Versuch.

Ein Zimmer (Fig. 290) wird so eingerichtet, daß jede Luftströmung so gut wie möglich ausgeschlossen ist. Der Beobachter befindet sich außerhalb des Zimmers und beobachtet die Erscheinungen durch Fernrohre, die in die Wand eingelassen sind. Die über den Fernrohren angebrachten Lampen werfen das zum Ablesen erforderliche Licht in das Zimmer. Mitten im

Digitized by Google

Zimmer hängt an einem Silberdraht ein horizontaler Stab aus Tannenholz, der an den Enden die Kugeln m und n von je 729 g Gewicht trägt. Diese Kugeln, der Holzstab und der Draht sind in einen hölzernen Kasten (in der Figur schraffiert) eingeschlossen. Außerhalb des Kastens hängen zwei große Bleikugeln M und N von je 158 kg Gewicht an den Enden einer horizontalen Stange von gleicher Länge wie ab. Die Stange kann um einen vertikalen Zapfen in der Decke des Zimmers vermittelst einer Schnurscheibe gedreht werden, die von außen her in Bewegung gesetzt wird. Beim Beginn des Versuches bildet die Linie MN mit ab rechte Winkel. Durch die Drehung wird die große Kugel M der kleinen Kugel m und die große Kugel N der kleinen Kugel n genähert. Während dies geschieht, beobachtet man in den Fernrohren, daß sich auch die kleinen Kugeln m und n den großen Kugeln M und N annähern, infolgedessen der Silberdraht eine Torsion erleidet. Die Torsion oder die Bewegung der Kugeln m und n wird nun in den Fernrohren abgelesen, und sie ist ein Maß für die Anziehung, welche die großen Kugeln auf die kleinen ausüben. Es fragt sich nun, welche Kraft einer bestimmten Torsion entspricht. Dies muß durch besondere Versuche ermittelt werden, und es kann in verschiedener Weise geschehen.

Wenn man durch Versuche mit dickeren Silberdrähten die Größe der Torsion im Verhältnis zur Kraft und zur Dicke des Drahtes gemessen hat, und wenn man weiß, daß bei gleicher Torsion die Kraft der vierten Potenz des Durchmessers umgekehrt proportional ist, so kann man aus der Dicke des Drahtes die Kraft berechnen.

In dem vorliegenden Falle ist es besser, die Größe der Kraft durch Versuche zu ermitteln. Dies läßt sich z. B. in der Weise ausführen, daß man den Stab ab in Torsionsschwingungen versetzt und die Schwingungszeit beobachtet. Aus dieser läßt sich hier ebenso, wie bei den Pendelschwingungen, die Größe der Kraft berechnen.

Es gelang Cavendish, durch seine Versuche die außerordentlich kleine Anziehung zu bestimmen, die die beiden großen Bleikugeln auf die kleinen ausüben. Indem er diese Anziehung mit dem Gewicht der kleinen Kugeln, d. h. mit der Anziehung der Erde, verglich, fand er mit Berücksichtigung des Umstandes, daß die Bleikugeln und die Erdkugel verschiedene Entfernung von m und n haben, für die mittlere Dichtigkeit der Erde den Wert 5,49.

Ähnliche Versuche mit ähnlichem Resultat wurden später von verschiedenen Physikern, unter anderen von Baily (1843), ausgeführt. Er untersuchte eine Menge von Kugeln aus den verschiedensten Stoffen, sogar aus Meteorstein, um die Untersuchung auch auf einen Stoff nichtirdischen Ursprungs auszudehnen. Er fand stets, daß die Anziehung dem Gewicht der Kugeln proportional ist, eine direkte Bestätigung, daß die Schwere eine Wirkung der allgemeinen Anziehung ist. Baily führte im ganzen etwa 2000 einzelne Versuche aus. Als mittlerer Wert ergab sich aus sämtlichen Versuchen für die Dichtigkeit der Erde der Wert 5,67.

In neuerer Zeit ist die Dichtigkeit der Erde sehr genau von König

Digitized by Google

und Richarz (1885) nach einem zuerst von Jolly angewandten Verfahren vermittelst der Wage, sowie von Boys (1892 bis 1895) nach dem Verfahren von Cavendish ermittelt worden. Die gefundenen Werte sind 5,51 (König und Richarz) und 5,53 (Boys).

§ 307. Durch Newtons Prinzipien findet eine ganze Menge astronomischer Erscheinungen ihre Erklärung, und zwar nicht nur die durch die Anziehung der Zentralkörper bedingte Bewegung der Planeten im großen ganzen, sondern auch zahlreiche kleine Abweichungen, die durch die Einwirkung anderer Himmelskörper verursacht werden. So hat der Mond mannigfache Abweichungen, weil auf ihn nicht nur die Erde einwirkt, sondern in hohem Grade auch die Sonne. Sogar die Planeten üben einen merklichen Einfluß auf den Mond aus. Diese Einflüsse bewirken Veränderungen in der Exzentrizität der Mondbahn und folglich in der Geschwindigkeit und der Entfernung von der Erde, der Neigung der Mondbahn gegen die Ekliptik, der Lage der Linie, in welcher die Ebene der Mondbahn die Ekliptik schneidet, dem von der Erde aus sichtbaren Teil der Mondoberfläche, u. s. w. Wir müssen uns damit begnügen, diese Abweichungen anzudeuten. Sie bilden aber jetzt sämtlich den Gegenstand genauer Berechnung.

§ 308. Ebenso machen sich bei den Planeten kleine Abweichungen (Perturbationen) von der durch die Anziehung der Sonne bestimmten Bahn bemerkbar, die durch die Anziehung der anderen Planeten verursacht werden. Auch diese Störungen fanden ihre Erklärung, ja sie dienten sogar dazu, die Größe der Anziehung und folglich die Masse dieser anderen Planeten zu ermitteln, was namentlich für diejenigen Planeten von besonderer Bedeutung ist, die keine Monde haben, bei denen man also die Masse des Planeten nicht aus der Entfernung und der Umlaufszeit eines Mondes ableiten kann.

Hier hat die Theorie der allgemeinen Anziehung später einen großen Triumph gefeiert. Im Jahre 1781 hatte W. Herschel den Planeten Uranus entdeckt, der nur unter besonders günstigen Umständen mit bloßem Auge gesehen werden kann und der nun der äußerste Planet unseres Systems war. Aber er hatte noch keinen vollen Umlauf (84 Jahre) gemacht, als man auf eine Störung in seiner Bewegung aufmerksam wurde, die nicht durch die Anziehung des Saturn und des Jupiter erklärt werden konnte. Verschiedene Astronomen zogen hieraus den Schluß, daß außerhalb der Uranusbahn noch ein Planet sein müsse, und sie versuchten aus den Störungen in der Bewegung des Uranus die Elemente des unbekannten Planeten, d. h. seine Entfernung von der Sonne, seinen Ort u. s. w. zu ermitteln. Er war jedoch so weit entfernt, daß er infolge der schwachen Beleuchtung durch die Sonne nur sehr schwer zu sehen sein mußte, so daß es von der Berechnung zur Beobachtung immer noch ein schwieriger Schritt war. Bessel in Königsberg war vielleicht der erste, der mit seinen Berechnungen fertig war, aber Krankheit hinderte ihn, zur Beobachtung überzugehen. Auch John C. Adams hatte den Ort des Planeten berechnet, allein Airy, der königliche Astronom in Greenwich, ließ sich in seinen Arbeiten nicht stören. Die

Digitized by Google

von Adams ausgeführten Berechnungen wurden Challis in Cambridge übergeben, der die Aufsuchung des Planeten in Angriff nahm. Da er jedoch keine hinreichend genaue Karte über den betreffenden Teil des Himmels besaß, mußte er erst eine solche anfertigen, und später hat man gefunden, daß er den neuen Planeten beobachtet und als Fixstern in die Karte eingetragen hat. So wurde Leverrier (1811 bis 1877, seit 1854 Direktor an der Pariser Sternwarte) der Glückliche, dessen Rechnungen und dessen Energie zum Ziele führten. Da man sich in Paris nicht mit der Aufsuchung des Planeten befassen wollte, wandte sich Leverrier an Galle in Berlin. Dieser war im Besitze genauer Fixsternkarten, und bereits am ersten Abend, am 23. September 1846, sah Galle den neuen Planeten und erkannte ihn als solchen, weil er eine kleine, schwach leuchtende Scheibe zeigte. Er erhielt den Namen Neptun.

Man hat später gefunden, daß das Ergebnis der Berechnungen Leverriers insofern nicht ganz genau war, als der Wert für die Entfernung, den er gefunden hatte, etwas zu groß war. Es war also ein glücklicher Zufall, daß er die Richtung, in welcher der Planet zu suchen war, einigermaßen richtig auffand. Für Newtons allgemeines Anziehungsgesetz ist es aber jedenfalls eine schöne Bestätigung, daß man auf Grund dieses Gesetzes einen Himmelskörper entdeckt hat, von dem man allerdings nicht sagen kann, daß er früher nie gesehen worden sei, denn er findet sich in älteren Fixsternkatalogen an der Stelle, wo er zur Zeit der Aufstellung der Kataloge stand, als Fixstern angeführt. Man hatte ihn als einen solchen angesehen, weil er sich infolge der großen Entfernung von der Sonne außerordentlich langsam bewegt.

§ 309. Da wir nun die Bekanntschaft der Geschwister der Erde gemacht haben, könnte es zweckmäßig erscheinen, hier eine Übersicht über die Größe derselben folgen zu lassen. Zunächst soll jedoch eine Bemerkung über die Entfernung der Erde von der Sonne vorausgeschickt werden, von der man zur Zeit Newtons eine bessere Vorstellung hatte als zur Zeit Hipparchs (§ 36), die aber auch jetzt noch nicht sehr genau bekannt war.

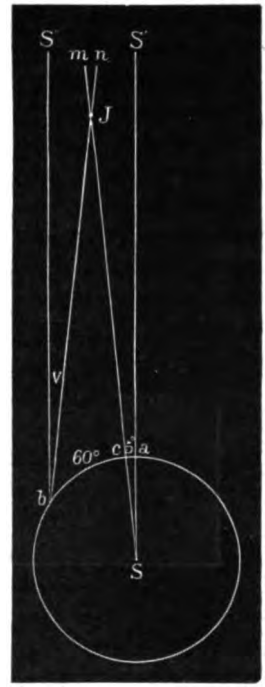
Dagegen kannte man sehr genau das Verhältnis der Entfernungen der Erde und der Planeten von der Sonne. Für die inneren Planeten, Merkur und Venus ist dieses Verhältnis leicht zu bestimmen. Man braucht nur zu beobachten, um wieviel Grad sich diese Planeten von der Sonne entfernen können. Nimmt man eine gerade Linie als Entfernung der Erde von der Sonne an, setzt die Winkel so an diese Linie an, daß die Erde im Scheitel der Winkel steht, und fällt von dem Punkt, in welchem sich die Sonne befindet, Senkrechte auf die anderen Schenkel dieser Winkel, so stellen diese Senkrechten die Radien der Merkurbahn und der Venusbahn vor.

Um das Verhältnis für die äußeren Planeten zu finden, muß man zuerst durch Beobachtung die Umlaufszeit der Planeten ermitteln. Weiß man zum Beispiel, daß Jupiter 12 Jahre braucht, um einen Umlauf um die Sonne zu machen, so kann man die Beobachtung beginnen, wenn Jupiter

Digitized by Google

mit der Sonne in Opposition ist, d. h. wenn die Erde in a (Fig. 291), die Sonne in S und Jupiter in der Richtung nach einem gewissen Fixstern S' steht. Der Ort des Planeten in der Linie aS' ist in der Figur nicht bezeichnet. Nach zwei Monaten ist die Erde in ihrer Bahn um 60° fortgeschritten und in b angekommen. Da sich Jupiter in derselben Zeit nur um 5° fortbewegt hat, steht er irgendwo in der Linie Scm. Wir messen nun von unserem neuen Standpunkt aus den Winkel v, den die Sehlinie nach demselben Fixstern, bS'', mit der Sehlinie nach dem Jupiter bildet. Dann steht Jupiter im Durchschnittspunkt J der beiden Linien cm und bn. Hiermit ist das Verhältnis der Entfernungen von Erde und Jupiter bestimmt.

Fig. 291.



Verhältnis der Entfernungen der Erde und des Jupiter von der Sonne.

Hat man erst alle Verhältnisse, so muß von einer der Entfernungen die wirkliche Größe ermittelt werden. Aus dieser und den bekannten Verhältnissen ergeben sich dann leicht die anderen wirklichen Entfernungen.

Aristarch und Hipparch (§ 33 bis 36) hatten die Entfernung der Erde von der Sonne zu messen versucht, aber das Ergebnis der Bestimmung (1 000 000 Meilen) war sehr ungenau, da die Beobachtung des Augenblickes, in dem der Mond halb beleuchtet ist, zu unsicher ist. Die Messung war von Kopernikus, Tycho Brahe und Kepler wiederholt worden und der letztere hatte als Ergebnis 3 000 000 Meilen gefunden. Aber die Messung war zu unsicher und das Resultat, wie wir sehen werden, viel zu klein.

Nun lenkte Domenico Cassini (§ 282) die Aufmerksamkeit auf den Umstand, daß Mars zur Zeit der Opposition nur halb so weit, ja zu gewissen Zeiten (wenn er im Perihel steht) noch weniger weit von der Erde entfernt ist als die Sonne. Auf seine Veranlassung wurde Mars zugleich in Paris und in Cayenne beobachtet. Zur Ausführung der letzteren Beobachtung begab sich Richer im Auftrage der Gesellschaft der Wissenschaften nach Cayenne. Die Messungen lieferten ein der Wahrheit ziemlich nahekommendes Resultat. Man fand für die Entfernung des Mars einen Wert, dementsprechend die Entfernung der Erde von der Sonne 18 bis 19 Millionen Meilen sein mußte.

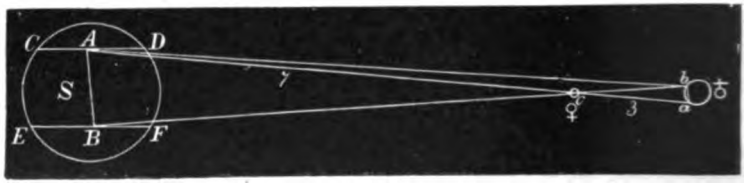
So standen die Sachen zur Zeit Newtons. Halley (§ 297 und II, § 225) wies darauf hin, daß uns Venus zur Zeit der Konjunktion noch viel näher kommt als Mars. Sie ist dann allerdings in der Regel unsichtbar. Nur in seltenen Fällen, wenn sie gerade zwischen der Erde und der

Digitized by Google

Sonne steht, bewegt sie sich als ein kleiner schwarzer Fleck langsam vor der Sonne her. Die Erscheinung tritt aber nur sehr selten ein. Es dauert nämlich über 100 Jahre, bis sich die Erscheinung wiederholt, aber dann folgen zwei Vorübergänge in einem Zwischenraum von 8 Jahren aufeinander. Nach Erfindung des Fernrohres wurde zuerst ein „Venusdurchgang" von Kepler für das Jahr 1631 vorausgesagt. Als er stattfand, war Kepler bereits gestorben. Der nächste Durchgang fand 1639 statt. Er wurde beobachtet, aber nicht in der Weise benutzt, wie später auf Halleys Vorschlag die Durchgänge von 1761 und 1769 benutzt wurden. Halley war eifrig dafür tätig, daß die günstige Gelegenheit nicht versäumt werden möge. Dies geschah denn auch nicht, und man erzielte für die Entfernung der Erde von der Sonne einen Wert, der die früheren an Genauigkeit bedeutend übertraf. Eine weitere Verbesserung erhielt er durch die Beobachtung der nächsten Venusdurchgänge in den Jahren 1874 und 1882.

Das Verfahren wird durch Fig. 292 erläutert. Die Venus wird zugleich an zwei Orten auf der Erde a und b beobachtet. Von a aus sieht man die

Fig. 292.



Beobachtung des Venusdurchganges.

Venus die Linie CD, von b aus die Linie EF beschreiben. Die Länge dieser Linien, sowie ihren Abstand AB, auf den es namentlich ankommt, kann man nun sehr genau bestimmen, und zwar durch Beobachtung der Zeit, welche Venus zum Durchlaufen der Linien CD und EF braucht. Da man nämlich die Winkelgeschwindigkeiten kennt, mit denen sich die Erde und die Venus in ihren Bahnen bewegen, so ergibt sich aus der Dauer des Vorüberganges die Länge der Linie AB und aus dieser dann der Abstand dieser Linie vom Mittelpunkte des Kreises. Da dasselbe für EF gilt, ist AB als Bruchteil des Sonnendurchmessers bestimmt. Wir wollen annehmen, es sei $^1/_{90}$ desselben (in der Figur ist AB der Deutlichkeit halber viel größer gezeichnet). Aus der Ähnlichkeit der beiden Dreiecke, deren Grundlinien AB und ab sind und deren Spitzen beide in c (Venus) liegen, folgt, daß sich die Entfernung der Venus von der Sonne zur Entfernung der Venus von der Erde wie AB zu ab, nämlich 7 : 3 verhält. Sind also die beiden Beobachter in a und b z. B. 900 Meilen voneinander entfernt, so ist die Linie AB gleich 2100 Meilen. Der 90. Teil des Sonnendurchmessers ist also 2100 Meilen, also ist der ganze Sonnendurchmesser ungefähr 189 000 Meilen. Aus dem Durchmesser der Sonne und der scheinbaren Größe (ungefähr

Digitized by Google

$^1/_2{}^0$) ergibt sich dann leicht die Entfernung der Sonne, die fast genau 20 000 000 Meilen ist.

Die neueren Messungen der Lichtgeschwindigkeit (§ 287 bis 288) haben ein neues Mittel gegeben, die absolute Größe der Entfernungen in unserem Sonnensystem zu bestimmen. Als Römer (§ 283) die Geschwindigkeit des Lichtes aus seinen Beobachtungen der Verfinsterung der Jupitermonde ableitete, setzte er die Geschwindigkeit der Erde als bekannt voraus. Umgekehrt kann man aus der bekannten Geschwindigkeit des Lichtes die Geschwindigkeit der Erde berechnen. Aus dieser ergibt sich dann für die Entfernung der Erde von der Sonne ein Wert, der mit dem angeführten Wert gut übereinstimmt.

Bradley (§ 284) setzte ebenfalls bei seiner Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit die Geschwindigkeit der Erde als bekannt voraus. Auch hier kann die Rechnung zur Kontrolle der angeführten Zahl umgekehrt werden.

§ 310. Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung der wichtigsten Größenverhältnisse des Planetensystems:

	Zeichen	Abstand von der Sonne Erde = 1	Umlaufszeit in Jahren	Rotationsdauer in Erdtagen	Durchmesser des Äquators in Meilen	Masse Erde = 1	Dichte Wasser = 1	Schwere an der Oberfläche Erde = 1
Sonne	☉	—	—	25—28	184 000	320 000	1,4	27,5
Merkur	☿	0,39	0,24	geb.	650	0,08	7,7	0,5
Venus	♀	0,72	0,62	geb.	1 640	0,8	5,2	0,9
Erde	♁	1	1	1	1 720	1	5,6	1
Mars	♂	1,5	1,9	1,02	930	0,1	4,1	0,4
Jupiter	♃	5,2	12	0,41	19 200	310	1,3	2,6
Saturn	♄	9,5	30	0,43	17 000	92	0,7	1,1
Uranus	♅	19,2	82	?	7 300	15,8	1,0	0,9
Neptun	♆	30	165	?	7 600	18,5	1,2	1,0

Die meisten Angaben der Tabelle bedürfen keiner weiteren Erläuterung. Die Ermittelung der Rotation der Körper macht einige Schwierigkeit. Es kommt darauf an, einen bestimmten Punkt der Oberfläche ins Auge zu fassen und nach Verlauf einer Umdrehung des Planeten wiederzuerkennen. Die Sonnenflecke sind aber veränderlich und haben, wie es scheint, eine eigene Bewegung auf der Sonnenoberfläche, denn am Äquator brauchen sie zu einem Umlauf 25 Tage, unter 45° nördlicher und südlicher Breite ungefähr 28 Tage. Weiter nach den Polen hin werden selten Flecke beobachtet.

Merkur und Venus haben eine „gebundene" Umdrehungszeit, d. h. sie wenden der Sonne immer dieselbe Seite zu, wie Schiaparelli vor einigen Jahren entdeckt hat, während man früher beobachtet zu haben glaubte, daß sie eine Umdrehungszeit von einem Tage hätten.

Digitized by Google

Die beiden großen Planeten Jupiter und Saturn machen eine Umdrehung in ungefähr 10 Stunden. Sie zeigen infolge der großen Zentrifugalkraft eine bedeutende Abplattung. Dieselbe beträgt für Jupiter ungefähr $^1/_{16}$, für Saturn $^1/_{10}$ des Durchmessers.

Bei der Berechnung der Schwere an der Oberfläche spielt selbstverständlich sowohl die Masse, als auch der Abstand vom Mittelpunkte (Radius) eine Rolle.

Schließlich mag bemerkt werden, daß die Planeten hinsichtlich der Größe in zwei Gruppen zerfallen, die vier kleineren, die der Sonne näher stehen, und die vier größeren, welche von der Sonne weiter entfernt sind.

§ 311. Alle Planeten, mit Ausnahme der beiden ersten, Merkur und Venus, besitzen Nebenplaneten oder Monde (Satelliten, Trabanten). Mars besitzt zwei außerordentlich kleine Monde, die 1877 von Hall in Washington entdeckt wurden. Sie haben nur eine bis zwei Meilen Durchmesser. Ihre Entfernungen vom Mars sind nur 1270 und 3180 Meilen und ihre Umlaufszeiten $7^1/_2$ und $30^1/_3$ Stunden. Jupiter hat fünf Monde. Als Entdecker der vier ersten wird gewöhnlich Galilei genannt, der sie im Januar 1610 beobachtete. Sie sind aber wahrscheinlich schon im Dezember 1609 vom Hofastronomen Simon Marius (Mayr) in Ansbach beobachtet worden. Diese vier Monde sind alle größer und haben größere Entfernungen vom Hauptplaneten als unser Mond. Für den ersten und den vierten sind die Abstände vom Jupiter 66 000 und 252 000 Meilen, die Umlaufszeiten 1 Tag $18^1/_2$ Stunden und 16 Tage $16^1/_2$ Stunden. Der fünfte Jupitermond wurde 1892 von Barnard auf der Licksternwarte (auf dem Mount Hamilton in Kalifornien) entdeckt. Seine Entfernung vom Jupiter beträgt 23 000 Meilen und seine Umlaufszeit 12 Stunden. Uranus hat vier Monde in Abständen von 28 000 bis 84 000 Meilen und mit Umlaufszeiten von $2^1/_2$ bis $13^1/_2$ Tagen. Neptun hat einen Mond. Sein Abstand ist 48 000 Meilen und seine Umlaufszeit 5 Tage 21 Stunden.

Am reichsten ausgestattet ist Saturn, der außer den Ringen acht Monde besitzt. Für dieses System gelten die in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellten Zahlen. Die Umdrehungszeit der Ringe ist jedoch nicht durch Beobachtung, sondern durch Berechnung gefunden. Die Abstände und Umlaufszeiten der Monde stehen nämlich in dem durch das dritte Keplersche Gesetz bestimmten Zusammenhang. Die Ringe müssen natürlich ebenfalls dieses Gesetz befolgen. Denn hätten sie eine größere Geschwindigkeit, als das Gesetz erfordert, so würden sie durch die Zentrifugalkraft weiter nach außen getrieben werden. Hätten sie dagegen eine geringere, so würden sie sich dem Planeten nähern. Ein Ring kann nur existieren, wenn er die seiner Entfernung zukommende Geschwindigkeit besitzt. Die Ringe sind höchst wahrscheinlich keine zusammenhängenden Massen, sondern Anhäufungen einer Unmasse kleiner Körper. Durch diese Annahme erklärt es sich auch, daß die Ringe einerseits einen Schatten auf den Planeten werfen können, während man anderseits Fixsterne durch dieselben hindurch sehen kann. Der innere Rand des Ringes

Digitized by Google

ist, so lange man ihn kennt, also im Laufe einiger Jahrhunderte, nach innen merklich gewachsen. Wenn dieses Wachsen anhält, so ist es nicht unwahrscheinlich, daß einmal durch Zusammenstoßen des Ringes mit dem Planetenkörper eine Katastrophe eintritt, deren Tragweite sich nicht leicht voraussagen läßt.

	Abstand vom Zentrum in Meilen	Umlaufszeit		
Oberfläche des Saturn	8 500	— d	10 h	14 m
1. Ring, innerer Rand	10 300	—	5	20
Grenze vom 1. und 2. Ring	12 300	—	6	57
2. Ring, äußerer Rand	16 800	—	11	6
3. Ring, innerer Rand	17 200	—	11	30
3. Ring, äußerer Rand	19 400	—	13	46
1. Mond, Mimas	27 000	—	22	37
2. „ Enceladus	35 000	1	8	53
3. „ Tethys	43 000	1	21	18
4. „ Dione	56 000	2	17	41
5. „ Rhea	78 000	4	12	25
6. „ Titan	181 000	15	22	41
7. „ Hyperion	219 000	21	7	8
8. „ Japetus	512 000	79	7	54

Die Ebenen der Mondbahnen fallen annähernd mit der Ebene des Ringes zusammen. Nur die Bahn des 6. Mondes (Titan) weicht stärker von der Ebene des Ringes ab. Sie bildet mit dieser einen Winkel von $7^1/_2{}^\circ$.

§ 312. Bevor wir das Planetensystem verlassen, wollen wir noch in Gedanken durch eins der besten modernen Fernrohre einen Blick auf dasselbe werfen, um zu sehen, ob sich hier vielleicht irgendwo Verhältnisse finden, die mit dem Zustande der Erdoberfläche einige Ähnlichkeit haben.

Was zunächst den Mond betrifft, so beobachtete bereits Galilei die Berge (§ 142), welche die Oberfläche desselben aufweist, die großen Ringgebirge bis zu 30 Meilen Durchmesser, sowie die zahllosen kleinen Krater bis hinab zu einem Durchmesser von 400 m. Galilei gab zugleich ein Verfahren an, wie sich die Höhe der Berge aus der Länge der Schatten, die sie werfen, berechnen läßt. Man hat jetzt sehr genaue Mondkarten mit allen Höhenangaben, ja wir haben Reliefkarten von der Mondoberfläche, die es wünschenswert erscheinen lassen, daß wir von der Erdoberfläche Karten von gleicher Vollkommenheit hätten. Ferner zeigt die Oberfläche des Mondes Furchen oder Risse (Rillen, Fig. 150), die nicht bei jeder Beleuchtung sichtbar sind. Die Höhe der Mondberge steht der Höhe der Berge auf der Erde nur wenig nach. Da aber der Mond viel kleiner als die Erde ist, so treten die Berge verhältnismäßig viel stärker hervor als die Unebenheiten der Erdober-

Digitized by Google

fläche. Dazu kommt noch, daß sie im allgemeinen viel schärfere Konturen haben, als die Berge auf der Erde.

Das letztere hängt damit zusammen, daß auf dem Monde kein Wasser ist, welches seinen zerstörenden und nivellierenden Einfluß geltend machen könnte. Zur Zeit, als das Fernrohr in Gebrauch kam, hat man allerdings den ebenen Strecken von dunkler Farbe auf dem Monde die Bezeichnung „Meere" beigelegt, allein Wasser ist nicht vorhanden. Wenn der Mond eine ähnliche Atmosphäre hätte wie die Erde, so würde sie ebenso wie diese am Tage Licht in die Schatten der Berge werfen, und diese würden nicht, wie es tatsächlich der Fall ist, schwarz, sondern grau erscheinen. Außerdem würde ein Stern, der den Mond bedeckt, nicht augenblicklich hinter der Mondscheibe verschwinden und augenblicklich wieder zum Vorschein kommen, sondern die Lichtbrechung in der Atmosphäre würde bewirken, daß der Stern am Rande des Mondes scheinbar kurze Zeit stehen bleibt. Auch würde der Stern wahrscheinlich seine Farbe etwas ändern. Sollte doch etwas Luft auf dem Monde sein, so müßte sie sehr verdünnt sein. Die Dichte der Luft würde nicht $^1/_{300}$ von der Dichte unserer Atmosphäre sein können, ohne daß sie sich bemerklich machte.

Da auf dem Monde Wasser und Luft fehlen, kann von einem Leben wie auf der Erdoberfläche keine Rede sein. Es ist auch mit den vollkommensten Fernrohren nichts zu bemerken, was auf etwas derartiges hindeutet. Die Oberfläche des Mondes befindet sich, wie es scheint, im Zustande vollkommener Erstarrung. Einigemal hat man an einem einzelnen Krater eine Veränderung zu bemerken geglaubt, aber auch dies ist zweifelhaft.

Venus scheint ganz in Nebel (Wolken) eingehüllt zu sein, so daß wir von der Oberfläche dieses Planeten nichts sehen können. Dasselbe gilt vom Merkur.

Dagegen sind für unseren nächsten Nachbar nach der entgegengesetzten Richtung hin, für Mars, die Bedingungen für die Beobachtung sehr günstig, denn wenn er uns am nächsten ist, wendet er uns die beleuchtete Seite zu. Die Verhältnisse auf der Oberfläche dieses Planeten sind aber so eigentümlich und von den Zuständen auf der Erde so abweichend, daß sie uns bis heute noch ein Rätsel sind.

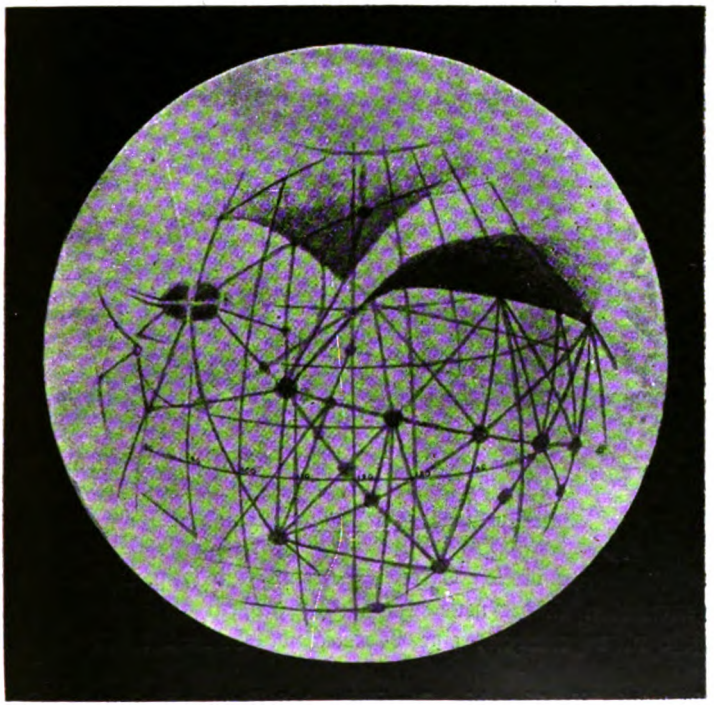
Schon seit langer Zeit hatte man beobachtet, daß sich am Nordpol und am Südpol des Mars ein hellerer Fleck befindet, und daß diese Flecke an dem Pol, wo Winter ist, größer, und an dem Pol, wo Sommer ist, kleiner werden. Man denkt natürlich sofort an die Eis- und Schneemassen an den Polen der Erde. Aber bereits hier bietet sich eine Schwierigkeit. Da nämlich in der größeren Entfernung die Wirkung der Sonne ungefähr nur halb so stark ist wie auf der Erde, sollte man denken, auf dem Mars sei es so kalt, daß das Wasser überall gefroren sein müßte. Man könnte allerdings annehmen, daß Mars eine größere Eigenwärme als die Erde besitzt, etwa infolge des Zusammenstoßes mit einem anderen kleinen Weltkörper, oder daß der Schnee nicht Eis, sondern eine andere erstarrte Flüssigkeit ist.

Digitized by Google

Es würde auch nicht so unbegreiflich sein, daß die dunkleren Strecken, die man namentlich früher als Meere ansah, in Form und Größe etwas veränderlich sind, denn da sie kein zusammenhängendes Meer bilden, könnte der Wasserstand in diesen Seen zu gewissen Zeiten steigen und zu anderen Zeiten sinken. Auch könnten die Grenzen derselben durch Wolken verwischt werden.

Aber abgesehen von dieser Veränderlichkeit bietet die Oberfläche des Mars einen höchst merkwürdigen Anblick (Fig. 293). Geradlinige Meeresufer und lauter geradlinige Flüsse sind auf der Erde unbekannt. Man hat

Fig. 293.



Der Planet Mars.

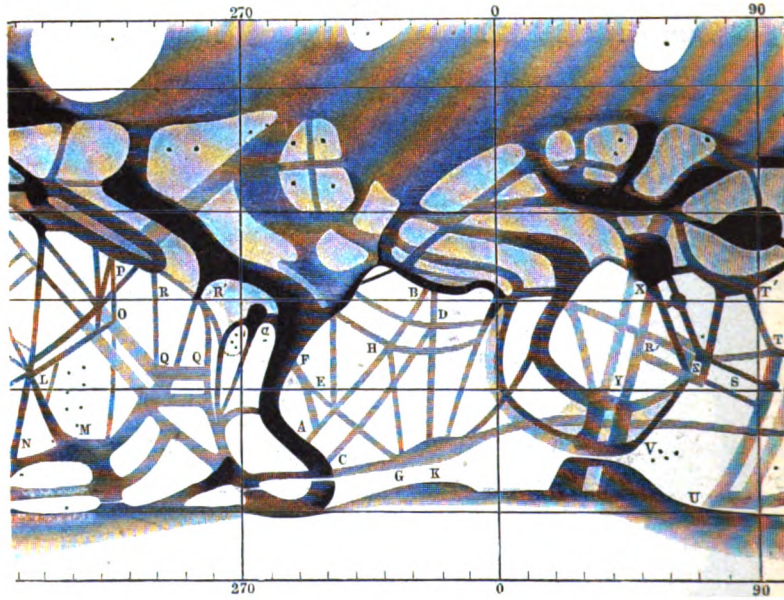
diese geradlinigen Flüsse als Kanäle bezeichnet und angenommen, sie seien von hochstehenden intelligenten Wesen angelegt worden. Bedenkt man aber, daß diese „Kanäle" mehrere Meilen breit sind, so bleibt uns die hohe Intelligenz dieser Wesen doch unverständlich. Man hat daher auch seine Zuflucht zu anderen Erklärungen genommen und die Linien z. B. für Spalten im Boden oder im Eise erklärt. Auch hat man in ihnen Landstrecken vermutet, die mit Vegetation bedeckt sind und deren Richtung durch Wasserleitungen bedingt wird, die von intelligenten Wesen angelegt sind. Für die Phantasie findet

Digitized by Google

ſich, wie man ſieht, hier Spielraum genug, aber der Verſtand fühlt ſich durch dieſe Vermutungen wenig befriedigt.

Bedeutend erſchwert wird die Erklärung noch durch eine eigentümliche Erſcheinung, die man die Verdoppelung der Kanäle zu nennen pflegt. Dieſelbe tritt namentlich zur Zeit der Tag- und Nachtgleiche ein und beſteht darin, daß an die Stelle eines Kanals zwei parallele Kanäle treten, die durch

Fig. 294.



Verdoppelung der Kanäle auf dem Mars.

einen mehrere Meilen breiten Streifen getrennt ſind (Fig. 294). Dieſe Erſcheinungen werden in der neueren Zeit mit großem Eifer verfolgt, aber es iſt bis jetzt nicht gelungen, eine befriedigende Erklärung für dieſelben zu finden.

Sehr wenig iſt über die Oberfläche des Jupiter bekannt. Sie zeigt eine Anzahl von dunkeln, parallelen Streifen von veränderlichem Anſehen (Fig. 149). Sie machen den Eindruck von Wolkenſchichten.

§ 313. **Kepler** hatte in ſeinen jüngeren Jahren über den Abſtand der Planeten von der Sonne nachgedacht und gefunden (§ 72), daß dieſe ſo beſchaffen waren, daß man die fünf regelmäßigen Körper in die Zwiſchenräume zwiſchen den Kugeln legen kann, auf denen man ſich die Planetenbahnen angebracht denken kann. Ähnlichen Spekulationen begegnet man auch in ſpäteren Zeiten noch. So veröffentlichte 1766 Profeſſor **Titius** (Tietz) in Wittenberg das folgende Geſetz über den Abſtand der Planeten von der Sonne, indem er den Abſtand des Merkur mit 4 bezeichnete.

Digitized by Google

Merkur	$4 = 4$	
Venus	$7 = 4 +$	1.3
Erde	$10 = 4 +$	2.3
Mars	$16 = 4 +$	4.3
Jupiter	$52 = 4 + 16.3$	
Saturn	$100 = 4 + 32.3$	

Später kam hinzu:

Uranus	$196 = 4 + 64.3$.	

Das Gesetz wurde später von Bode (1747 bis 1826) mit etwas anderen Zahlen (8, $8 + 3.2$, $8 + 3.2^2$, $8 + 3.2^3$ u. s. w.) ausgedrückt, die mit den wirklichen Verhältnissen besser im Einklange standen. Es wird daher zuweilen auch als das Bodesche Gesetz bezeichnet. Obwohl es nur eine zufällige, nicht eine physikalische Gesetzmäßigkeit zum Ausdruck bringt, hat es Veranlassung gegeben, nach einem Planeten im Abstande $4 + 8.3 = 28$ (zwischen Mars und Jupiter) zu suchen. Ja es bildete sich eine Gesellschaft von Astronomen, die im Jahre 1800 den Tierkreis unter sich teilten, um diesen unbekannten Planeten aufzufinden. — Da entdeckte Piazzi in Palermo, der übrigens nicht zu der Gesellschaft gehörte, am ersten Tage des Jahrhunderts (1. Januar 1801) einen kleinen Himmelskörper, der sich bewegte und den er anfangs für einen Kometen hielt. Später zeigte es sich jedoch, daß er sich in einer ziemlich kreisförmigen Bahn um die Sonne bewegte. Piazzi war durch Krankheit genötigt, seine Beobachtung am 11. Februar abzubrechen, und da seine Mitteilung Bode erst im März erreichte, nachdem der Planet im Sonnenlicht unsichtbar geworden war, konnte die Bahn desselben nicht mit Sicherheit festgestellt werden. Er hätte daher im Frühjahr sozusagen von neuem entdeckt werden müssen, wenn nicht der junge Gauß (II., § 241) gerade um diese Zeit eine Art Wahrscheinlichkeitsrechnung (die Methode der kleinsten Quadrate) erfunden hätte, vermittelst deren er aus den zahlreichen Beobachtungen Piazzis den wahrscheinlichen Fehler entfernen konnte. Der Planet wurde am 31. Dezember 1801 von Zach in Gotha, dem Begründer jener Gesellschaft, und am folgenden Abend von Olbers (1758 bis 1840) in Bremen aufgefunden. Er bekam den Namen Ceres und seine Entfernung von der Sonne (das 2,77fache der Entfernung der Erde) entsprach sehr gut dem Titiusschen Gesetze.

Einige Monate später entdeckte Olbers noch einen Planeten im Abstande 2,77, dessen Bahn ebenfalls von Gauß berechnet wurde. Er erhielt den Namen Pallas. Sodann entdeckte Harding (1765 bis 1834) in Lilienthal bei Bremen die Juno im Abstande 2,67, und Olbers (1807) die Vesta im Abstande 2,36. Nach einer längeren Pause entdeckte Hencke in Driesen 1845 die Asträa, und seit dieser Zeit ist die Zahl der kleinen Planeten oder Planetoiden (Asteroiden) von Jahr zu Jahr gewachsen, so daß man jetzt nahezu 500 kennt. Sie sind sämtlich so klein, daß man ihren Durchmesser nicht mit Sicherheit bestimmen kann. Selbst die größten von ihnen (Ceres, Pallas, Vesta) haben wahrscheinlich nur einen Durchmesser von 30 bis 40 Meilen.

Digitized by Google

Die mittlere Entfernung der Planetoiden ist das Doppelte bis Vierfache der Entfernung der Erde. Eine ganz besondere Stellung unter diesen Weltkörpern nimmt der 1898 von Witt in Berlin entdeckte Eros ein, indem seine Bahn nicht, wie die Bahnen der übrigen, vollständig in die Zone zwischen der Marsbahn und der Jupiterbahn fällt, sondern etwa zur Hälfte zwischen die Erdbahn und die Marsbahn. Zur Zeit des Perihels kann er sich der Erde bis auf 2,7 Millionen Meilen nähern. Die Bahnen der Planetoiden sind zum Teil gegen die Ekliptik stark geneigt (Ceres $10^1/_2{}^0$, Pallas $34^3/_4{}^0$), und die Bahnen dieses ganzen Schwarmes von kleinen Weltkörpern sind so vielfach untereinander verschlungen, daß, wenn es feste Ringe wären und man wollte einen von ihnen entfernen, alle übrigen nachfolgen würden.

Olbers und andere haben die Vermutung ausgesprochen, daß die Planetoiden die Bruchstücke eines explodierten Planeten seien, der sich früher zwischen Mars und Jupiter bewegt habe. In diesem Falle müssen sie einen gemeinsamen Ausgangspunkt gehabt haben, und die verschiedenen Ellipsen, die die einzelnen Körper von diesem Punkte aus beschrieben haben, müssen wieder in denselben Punkt zurücklaufen. Diese Bahnen mußten sie dann beibehalten, bis sie infolge der Störungen, die sie aufeinander ausübten und die von anderen Planeten auf sie ausgeübt wurden, neue Bahnen einschlugen. Jetzt sind die Bahnen allerdings weit davon entfernt, einen gemeinsamen Punkt zu besitzen, und wenn die Annahme, daß die Planetoiden die Fragmente eines ehemaligen großen Planeten sind, richtig ist, so muß seit der Explosion jenes Planeten ein sehr langer Zeitraum verflossen sein. — Nach einer anderen Ansicht hat Jupiter, der zuerst in dieser Gegend durch Ansammlung von Stoff entstanden sein muß, verhindert, daß sich der Stoff der Planetoiden ebenfalls zu einem größeren Körper angesammelt hat. Auch hat man den Schwarm der Planetoiden als einen dem Saturnring vergleichbaren Ring um die Sonne aufgefaßt.

§ 314. Merkwürdigerweise kam Newton erst spät zu der Erkenntnis, daß auch die Kometen denselben Gesetzen wie die übrigen Himmelskörper unterworfen sind.

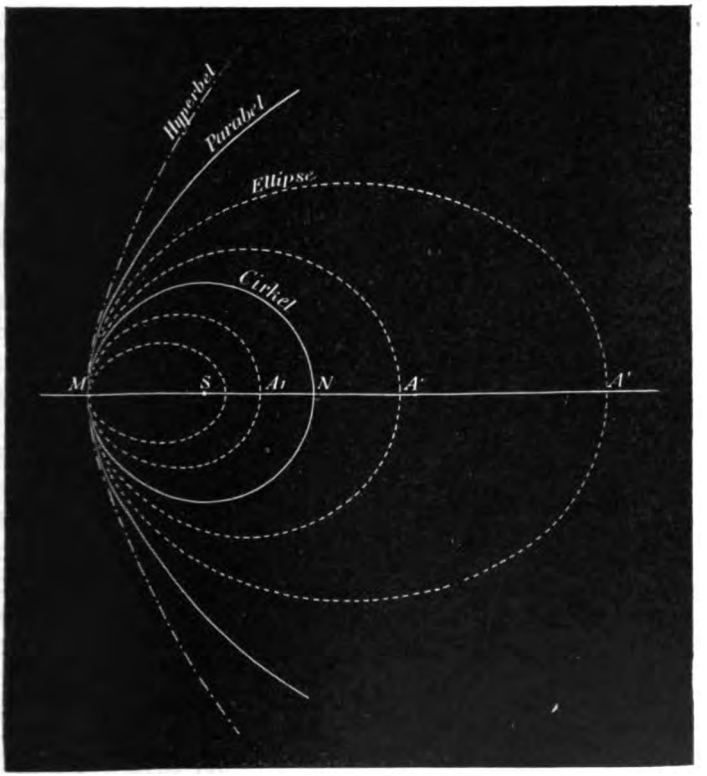
Tycho Brahe hatte durch seine Messungen gefunden, daß die Kometen so weit von der Erde entfernt sind, daß sie keine atmosphärischen Erscheinungen sein können, sondern Weltkörper sein müssen. Kepler war durch Rechnung zu dem Resultat gekommen, daß ihre Bahn geradlinig sei. Der große Komet im Jahre 1680 wurde fleißig beobachtet, namentlich von Flamsteed (§ 284), welcher meinte, daß es derselbe Komet gewesen sein müsse, der erst auf der einen Seite und später auf der anderen Seite der Sonne sichtbar gewesen war. Er trat hierüber mit Newton in Briefwechsel, der aber merkwürdigerweise an seiner Ansicht, daß die Bahn geradlinig sei, festhielt. Dörfel (1643 bis 1688) berechnete die Bahn dieses Kometen und fand, daß sie eine Parabel war und daß der Komet in seiner Bewegung das Keplersche Flächengesetz befolgte. Endlich im Jahre 1686 hatte Newton die Überzeugung gewonnen, daß sich auch die Kometen dem allgemeinen Anziehungs-

Digitized by Google

gesetz gemäß bewegen. Er zeigte jetzt, daß sich jeder Körper unter dem Einfluß der Sonne in einem Kegelschnitt bewegen muß, in dessen Brennpunkt die Sonne steht, und daß die Art und Form dieses Kegelschnittes vollständig bestimmt ist, wenn man für einen gegebenen Augenblick den Ort, die Geschwindigkeit und die Bewegungsrichtung des Körpers kennt.

Man erhält am leichtesten einen Überblick über die verschiedenen Arten der Bahn, wenn man den Himmelskörper in dem Augenblick betrachtet, wenn er sich senkrecht zur Richtung nach der Sonne, also im Punkt M, Fig. 295, bewegt.

Fig. 295.



Die Gestalt der Bahn eines Himmelskörpers hängt von der Geschwindigkeit in M ab.

Wenn die Geschwindigkeit hier eine solche ist, daß die Zentrifugalkraft gleich der Schwerkraft ist, dann wird die Bahn ein Kreis MN. Wenn die Geschwindigkeit kleiner ist, so wird sich der Körper der Sonne etwas nähern und die Ellipse MA_1 beschreiben, so daß A_1 das Perihel und M das Aphel wird. Ist die Geschwindigkeit dagegen größer, so wird sich der Körper von der Sonne entfernen und die Bahn MA' oder MA'' beschreiben, so daß M das Perihel wird und A' oder A'' das Aphel. Je größer die Geschwindigkeit

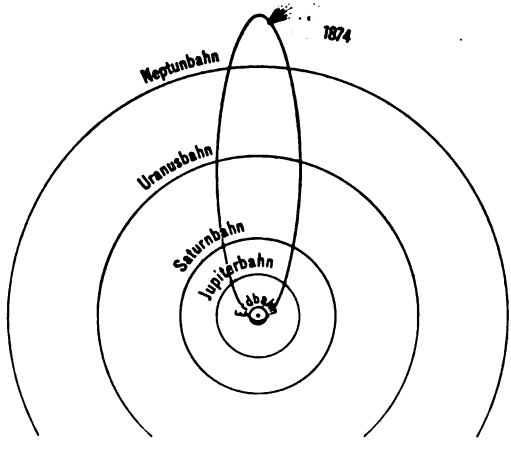
Digitized by Google

in *M* ist, desto weiter ist das Aphel entfernt und desto geringer ist die Geschwindigkeit in diesem, denn die Sonne wirkt auf den Körper während seiner Wanderung vom Perihel zum Aphel verzögernd. Vom Aphel bis zum Perihel dagegen wirkt die Sonne beschleunigend auf den Körper und er fällt gewissermaßen nach der Sonne hin, nur nicht in gerader Linie. Ist die Geschwindigkeit in *M* noch größer, so wird die Bahn eine Ellipse mit unendlich entferntem Aphel, d. h. eine Parabel. Eine noch größere Geschwindigkeit in *M* erzeugt eine Hyperbel. In den letzten Fällen ist es nur ein sehr kleiner Teil der Bahn in der Nähe der Sonne, den wir beobachten können, so daß es oft schwer zu entscheiden ist, ob die Bahn eine Parabel, die den Übergang von der Ellipse zur Hyperbel bildet, oder eine Hyperbel ist.

Dörfel bestimmte die Bahn des Kometen von 1680 als eine Parabel, so daß dieser Komet also niemals zur Sonne zurückkehren würde. Newton kam zu einem ähnlichen Resultat. Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, daß dieser Komet eine sehr langgestreckte Ellipse in ungefähr 574 Jahren beschreibt. Dann würde er derselbe Komet sein, der 44 v. Chr., 531 und 1106 n. Chr. sichtbar war, und er würde im Jahre 2255 wiederkehren müssen.

Halley berechnete die Bahn eines Kometen, der im Jahre 1682 erschien, und fand, daß sie eine Ellipse war und daß der Planet schon mehrmals gesehen worden war. Halley sagte das Wiedererscheinen des Kometen für 1758 bis 1759 voraus, was auch eingetroffen ist. Ebenso erschien er wieder im Jahre 1835, und „Halleys Komet" (Fig. 296) ist der erste sicher bestimmte Komet mit elliptischer Bahn. Seine kleinste Entfernung von der Sonne ist das 0,59fache, seine größte das 36,4fache der Entfernung der Erde. Er kommt der Sonne näher als Venus und entfernt sich von ihr weiter als Neptun. Seine Geschwindigkeit ist im Perihel 17 Meilen, im Aphel $^1/_3$ Meile in der Sekunde. Es ist wahrscheinlich derselbe Komet, der im Jahre 11 v. Chr., kurz vor Agrippas Tode, gesehen wurde. Daß die Bahn eines Kometen eine Ellipse ist, kann erst dann als ganz sicher gelten, wenn er mehrmals in der Sonnennähe beobachtet worden ist. Dies ist ungefähr bei einem Dutzend der Fall gewesen, die aber alle bis auf Halleys Komet für das bloße Auge unsichtbar sind. Mehrere, unter ihnen große und prächtige Kometen, haben

Fig. 296.



Halleys Komet.

Digitized by Google

Umlaufszeiten von mehr als 100 Jahren. Andere haben das Sonnensystem in hyperbolischer Bahn durchkreuzt und kommen niemals wieder.

Die Ebenen der Kometenbahnen haben nicht eine ähnliche Lage wie die Planetenbahnen. Sie stehen zuweilen senkrecht auf diesen. Auch die Bewegungsrichtung ist nicht dieselbe, sondern zuweilen sogar die entgegengesetzte von der Richtung, in welcher sich die Planeten bewegen. Wenn man nun ferner beachtet, daß nicht nur die Sonne, sondern namentlich die großen Planeten auf die Kometen anziehend wirken, so daß sich die Bahn bedeutend ändern kann, wenn sie in die Nähe eines Planeten kommen, so liegt die jetzt allgemein als richtig anerkannte Auffassung nahe, daß die Kometen in unserem Planetensystem fremde Körper sind, die auf ihrem Wege durch den Weltraum unter die Anziehung der Sonne kommen und infolgedessen gezwungen sind, sich in einem Kegelschnitt um die Sonne zu bewegen. Die Bahn ist in der Regel eine Hyperbel, da die Kometen aus unendlich weiter Entfernung kommen. Trifft es sich nun, daß Jupiter oder ein anderer Planet die Bahn ändert, so kann sich dieselbe in eine Ellipse verwandeln, und der Komet bewegt sich dann im Sonnensystem, bis vielleicht Jupiter oder ein anderer Planet die Bahn von neuem ändert und den Kometen wieder in einer anderen Richtung in den Weltraum hinaussendet. Das letztere geschah z. B. 1781 mit Lexells Komet, der eine geschlossene Bahn um die Sonne beschrieben hatte, der aber damals dem Jupiter zu nahe kam.

Man hat auch beobachtet, daß sich ein Komet in zwei oder drei mehr oder weniger getrennte Kometen auflöste, die schließlich vollständig unsichtbar wurden. In solchen Fällen hat man dann später an Stelle des Kometen einen starken Schwarm von Meteoriten (Sternschnuppen) beobachtet, die sich in der Kometenbahn bewegten.

§ 315. Newton hat in seinen Prinzipien auch einige astronomisch-geographische Verhältnisse erklärt. Er zeigte, daß die Schwere nicht nur abnehmen muß, wenn man sich über die Erdoberfläche erhebt, sondern auch wenn man in das Innere der Erde eindringt, da man hier einen Teil der Masse über sich hat, der der Anziehung nach dem Mittelpunkt hin entgegenwirkt. Newton bewies, daß eine Kugelschale nach innen keine anziehende Kraft ausübt. Wenn man sich daher in einem Punkt im Innern der Erde befindet, so steht man nur unter dem anziehenden Einfluß der Kugel, deren Radius die Entfernung dieses Punktes vom Mittelpunkte ist.

Wir haben in § 276 gesehen, daß Huygens und Newton hinsichtlich der Abplattung der Erde zu verschiedenen Resultaten kamen, weil Huygens die gesamte Anziehung in das Zentrum versetzte, während sie Newton gleichmäßig über die ganze Kugel verteilte. Aber selbst heute kann man noch nichts zuverlässiges über die Verteilung der Massen angeben, obgleich man sicher weiß, daß die Dichtigkeit der Erde im Durchschnitt 5,5 ist (§ 306), während die Oberflächenschichten (Wasser, Gesteine) eine viel geringere Dichtigkeit besitzen.

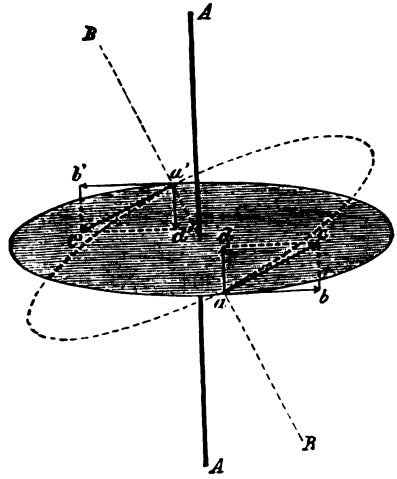
§ 316. Auch die Präzession (§ 44), die von Hipparch entdeckte

Digitized by Google

Erscheinung, daß die Erdachse ihre Richtung nicht beibehält, sondern im Laufe von 26 000 Jahren eine Kegelfläche beschreibt, wurde von Newton erklärt. Ein Körper hat nämlich infolge der Trägheit das Bestreben, seine Lage beizubehalten. Dies Bestreben macht sich jedoch bei einem schnell rotierenden Körper in anderer Weise geltend als bei einem ruhenden. Bei dem letzteren macht es sich als ein Widerstand geltend, den wir überwinden müssen, wenn wir die Lage des Körpers verändern wollen. Ist der Körper dagegen in Rotation begriffen, so setzt sich seine Bewegung mit der Bewegung, welche man ihm zu geben sucht, zu einer ganz anderen Bewegung zusammen.

Wollte man z. B. die Lage der Achse AA einer schnell rotierenden Scheibe (Fig. 297) so verändern, daß das obere Ende der Achse nach hinten, das untere nach vorn bewegt wird, so würde der Punkt a der Scheibe nach d und der Punkt a' nach d' kommen. Da diese Punkte aber infolge der Rotation der Scheibe nach b und b' kommen würden, so kommt nach dem Parallelogramm der Bewegungen (§ 176) a nach c und a' nach c'. Die Scheibe kommt also in die schiefe, durch punktierte Linien bezeichnete Stellung und die Achse in die Lage BB. Wenn also eine Kraft die Achse zu drehen strebt, so bewegt sich die Achse nicht in der Richtung, in welcher die Kraft wirkt, sondern in einer Ebene, die auf dieser Richtung senkrecht steht.

Fig. 297.



Vereinigung zweier Rotationen.

Wenn sich z. B. ein Kreisel auf dem Boden in schiefer Stellung dreht, so könnte man denken, er müsse umfallen, da er nur auf einer Spitze ruht. Der Kreisel fällt jedoch keineswegs um. Das obere Ende der Achse geht nicht nach unten, sondern nach der Seite und beschreibt einen Kreis um die Vertikallinie. Je mehr sich der Kreisel neigt, desto auffallender wird es, daß er nicht umfällt. Ja wenn man die Achse des Kreisels in einem Ringe (Fig. 298) laufen läßt, der mit einem Ansatz n auf eine Spitze gelegt werden kann, so hält sich der Ring in horizontaler Lage und anstatt herabzufallen, bewegt er sich horizontal um die Spitze o. Drückt man den Ring nach unten, so wird er nur in seiner Bewegung beschleunigt. Sucht man ihn durch einen Druck in seiner Bewegung zu beschleunigen, so erhebt er sich über die horizontale Stellung. Hält man ihn zurück, so senkt er sich unter dieselbe.

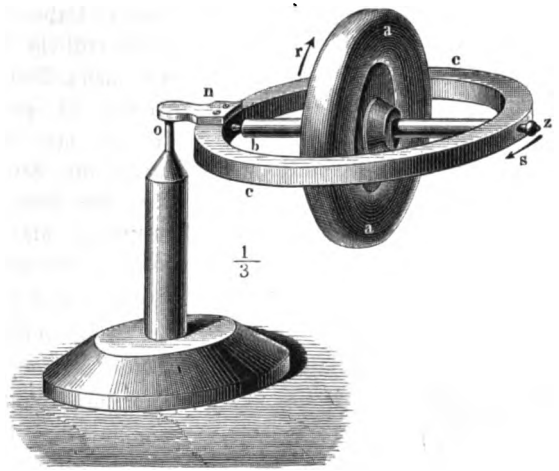
Da nun die Erde abgeplattet ist und die Scheibe — wenn man die abgeplattete Erde so nennen kann — nicht mit der Sonne und dem Mond

Digitized by Google

in derselben Ebene liegt, so werden diese die Scheibe in ihre Ebene zu drehen, also die Erdachse senkrecht zu dieser Ebene zu stellen streben. Dies hat zur Folge, daß sich die Achse nicht in der Richtung verschiebt, in der sie die Sonne und der Mond zu verschieben streben, sondern senkrecht zu dieser Richtung. Infolgedessen muß sie eine Kegelfläche beschreiben (vergl. Fig. 25).

Wie wir gesehen haben (§ 285), hat Bradley eine andere 18jährige Bewegung der Erdachse entdeckt. Sie hängt mit einer entsprechenden Schwankung der Mondbahn zusammen, die nicht mit der Erdbahn zusammenfällt, sondern mit dieser einen Winkel von ungefähr 5° bildet. Nun kann man die Erde und den Mond als eine rotierende Scheibe ansehen, deren Ebene nicht ganz mit derjenigen zusammenfällt, welche die Sonne durch ihre Anziehung erfordern würde. Die Folge davon ist eine Schwankung der Ebene der Mondbahn und zugleich des Erdäquators oder der Erdachse mit einer Periode von $18^1/_2$ Jahren.

Fig. 298.



Die Achse des Kreisels dreht sich in einer horizontalen Ebene.

§ 317. Endlich brachte Newton Klarheit in die bis dahin rätselhafte Erscheinung der Ebbe und Flut.

Die Erscheinung selbst war seit der ältesten Zeit bekannt. Der griechische Geograph Strabo (geb. 66 v. Chr.) erzählt, daß sie bereits den Phöniziern bekannt war. Im Mittelmeer, als einem Binnenmeer, ist die Erscheinung allerdings nicht zu beobachten, aber die Phönizier zogen ja auch durch die „Säulen des Herkules" in den offenen Ozean hinaus. Sie hatten bemerkt, daß die Erscheinung mit dem Monde zusammenhängt und daß sie zur Zeit des Neumondes und des Vollmondes am stärksten ist. Plinius und Plutarch (geb. 50 n. Chr.) erzählen ähnliches von Pytheas aus Massalia, der weit nach Norden bis zur Insel Thule zog.

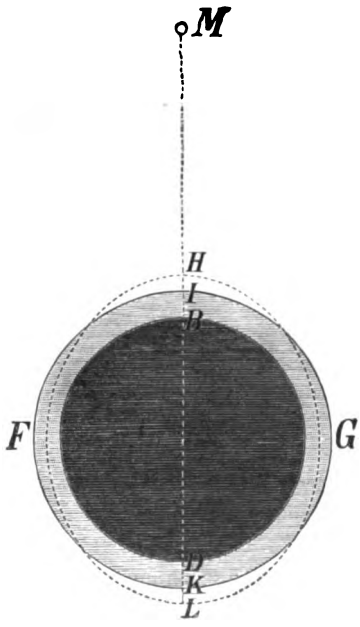
Man suchte die Erscheinung in verschiedener Weise zu erklären. Der italienische Jesuit Cabeo (1585 bis 1650) meinte, der Mond bringe auf dem Meeresboden eine spirituöse Substanz hervor, die die Flut verursache. Stevin spricht von der Anziehungskraft des Mondes. Da aber auch auf der entgegengesetzten Seite Hochwasser ist, so glaubte er, es müsse auch auf dieser Seite ein anziehender Punkt sein. Auch Kepler ahnte etwas von

Digitized by Google

der Anziehungskraft, konnte aber doch die Erscheinung nicht erklären. Galilei verwarf diese Erklärungen und sprach von Schwungkraft. Nach der Entdeckung des Luftdruckes glaubten einige, der Mond wirke auf den Luftdruck und dieser wieder auf die Meeresfläche. Andere begnügten sich damit, die Erscheinung für ein Geheimnis der Natur zu erklären.

Da trat Newton in seinen Prinzipien mit der Erklärung hervor, daß die Flut durch den Unterschied in der Anziehung des Mondes auf das dem Mond zugewendete Meer und auf den Erdkörper selbst verursacht wird. Hierdurch entsteht eine Erhebung des Wassers auf dieser Seite der Erde, *IH*, Fig. 299. Ferner ist ein Unterschied in der Anziehung des Mondes auf den festen Erdkörper und den vom Mond abgewendeten Teil des Meeres. Hier zieht der Mond sozusagen die Erde vom Meere hinweg, so daß sich auch hier das Meer über die Erdoberfläche erhebt (*KL*).

Fig. 299.



Ebbe und Flut.

Man wird sofort bemerken, daß die Sonne etwas ähnliches bewirken kann, und man könnte denken, die Wirkung der Sonne müsse stärker sein als die Wirkung des Mondes, denn die Sonne übt trotz der größeren Entfernung infolge ihrer großen Masse eine viel stärkere Anziehung auf die Erde aus, als der Mond. Es ist aber nicht die Größe der Anziehung an und für sich, auf die es ankommt, sondern der Unterschied in der Anziehung auf die feste Erdkugel und das Meer. Dies wird am besten durch eine kleine Berechnung erläutert.

Die Masse der Erde sei 1, also die Masse des Mondes ungefähr $^1/_{81}$ und die Masse der Sonne 320 000. Wird der Erdradius gleich 1 gesetzt, so ist die Entfernung des Mondes 60, die Entfernung der Sonne 60 . 400 = 24 000. Die Anziehung des Mondes auf den nächsten Teil der Erde ist dann $\frac{1}{81} \cdot \frac{1}{60^2}$ von der Schwere auf der Erdoberfläche, und die Anziehung des Mondes auf den Mittelpunkt der Erde $\frac{1}{81} \cdot \frac{1}{61^2}$. Der Unterschied dieser beiden Anziehungen ist

$$\frac{1}{81} \cdot \frac{1}{60^2} - \frac{1}{81} \cdot \frac{1}{61^2} = \frac{1}{81} \cdot \frac{61^2 - 60^2}{60^2 \,.\, 61^2} = \frac{1}{8800000}.$$

Digitized by Google

Der Unterschied zwischen der Anziehung der Sonne auf die Oberfläche und den Mittelpunkt der Erde ist

$$\frac{320\,000}{24\,000^2} - \frac{320\,000}{24\,001^2} = 320\,000 \cdot \frac{24\,001^2 - 24\,000^2}{24\,000^2 \cdot 24\,001^2} = \frac{1}{22\,000\,000}.$$

Die Wirkung der Sonne ist also $^2/_5$ von der Wirkung des Mondes. Vergleicht man die Anziehungen auf den Mittelpunkt und die Rückseite der Erde, so erhält man dasselbe Resultat.

Wenn also die Sonne und der Mond zusammenwirken, d. h. zur Zeit des Vollmondes und des Neumondes, so ist die Wirkung $1 + {}^2/_5 = {}^7/_5$. Dann ist Springflut. Wenn dagegen Sonne und Mond einander entgegenwirken (zur Zeit der Quadraturen), so ist die Wirkung nur $1 - {}^2/_5 = {}^3/_5$. Dann ist Nippflut.

Da nun die Erde im Laufe eines Tages eine Umdrehung macht, so muß an jedem Ort täglich zweimal Flut und zweimal Ebbe sein. Da aber die Flutwelle auf ihrer Wanderung von Osten nach Westen sowohl durch die alte Welt, als auch durch Amerika gehemmt wird, so vollzieht sich die Erscheinung ungestört nur südlich von Afrika und Amerika. Die Bewegung der Flutwelle wird durch die Verschiedenheit der Meerestiefe an verschiedenen Stellen, sowie durch die Gestalt und Verteilung der Kontinente und Inseln in hohem Grade beeinflußt. Ein Punkt an der Küste hat daher nicht gerade dann Hochwasser, wenn der Mond im Meridian steht, sondern eine bestimmte Anzahl von Stunden später, worüber die nautischen Jahrbücher Auskunft erteilen. Auch die Springfluten sind nicht zur Zeit des Vollmondes und des Neumondes am größten, sondern einen oder sogar mehrere Tage später.

§ 318. Indem sich die Erde von Westen nach Osten dreht und der Mond die Flutwelle so zu sagen festhält, wirkt diese gewissermaßen als eine Art Bremse, die einen Teil der Bewegungsenergie der Erde vernichtet. Doch ist hierdurch die Umdrehungsgeschwindigkeit der Erde während der historischen Zeit nicht merklich verzögert worden, denn die Länge des Tages ist noch dieselbe wie vor 2000 Jahren. Die in § 21 erwähnte Periode der Verfinsterungen besteht nämlich noch genau aus derselben Anzahl von Tagen (6585,32) wie damals. Es muß also auch der Maßstab, der Tag, noch derselbe sein.

Der Mond selbst dagegen hat wahrscheinlich, als er noch eine mehr flüssige Beschaffenheit hatte, ein Paar gewaltiger, durch die Erde verursachter Flutwellen gehabt, die seine Rotationsgeschwindigkeit vernichtet haben. Der Mond wendet der Erde immer dieselbe Seite zu und ist in dieser Richtung etwas gestreckt. Auch die Rotationsdauer des Merkur und der Venus ist wahrscheinlich nach und nach gleich der Umlaufszeit geworden, und zwar durch die flutbildende Wirkung der Sonne.

§ 319. Durch die glänzende mathematische Behandlung der Bewegung der Himmelskörper, von der wir einige Hauptzüge kennen gelernt haben, hat Newton wie kein anderer die Grundbegriffe der Mechanik aufgeklärt, und

Digitized by Google

hauptsächlich mit Rücksicht auf diese Tätigkeit bilden die zwei Zeilen seines jüngeren Zeitgenossen Pope keine Übertreibung:

„Nature and Natures Laws lay hid in Night
God said, Let Newton be, and all was light."

Wir begegnen Newton jedoch auch auf anderen Gebieten der Physik, auf denen er Großes geleistet hat. Hier finden sich jedoch auch Mißverständnisse, und bei seiner großen Autorität sind die auf diese Mißverständnisse begründeten Theorien fast ein ganzes Jahrhundert lang ein Hindernis gewesen, daß die richtige Auffassung allgemeine Anerkennung fand.

Newton ist einer der verhältnismäßig wenigen Naturforscher früherer Zeiten, die bereits bei Lebzeiten die gebührende Anerkennung für ihre Verdienste gefunden haben. Im Jahre 1695 wurde er zum Münzwardein bei der königlichen Münze ernannt, eine Stellung, die ihm 8000 Mark jährlich einbrachte, ohne daß er genötigt war, seine Professur in Cambridge aufzugeben, und im Jahre 1699 wurde er Münzmeister mit einem Gehalt von 24 000 Mark. Er verlegte seinen Wohnsitz nach Kensington, wo er zugleich zum Vorsitzenden der Royal Society gewählt wurde. In seinen alten Tagen wurde er von seiner Nichte, Frau Conduit, gepflegt. Er starb 1727 im Alter von 85 Jahren mit Hinterlassung eines bedeutenden Vermögens. Seine Leiche wurde auf Befehl des Königs Georg I. mit großer Pracht in der Westminsterabtei beigesetzt.

Über Newtons Auffassung des Verhältnisses zwischen der menschlichen Forschung und dem inneren Naturzusammenhange liegt eine bemerkenswerte Äußerung vor, die er als Greis getan hat: „Ich weiß nicht, was die Welt über meine Arbeiten denken wird, aber ich selbst komme mir nur wie ein Kind vor, welches am Strande spielte und etwas glattere Steinchen und etwas buntere Muschelschalen fand, als andere gefunden haben, aber der unermeßliche Ozean lag unerforscht vor meinen Blicken."

Newton hat auch einige religiöse Schriften hinterlassen. Sie erschienen im Jahre 1736 und handeln über den Propheten Daniel und die Offenbarung Johannis. Biot hat die Ansicht geäußert, daß diese Schriften während einer Periode geistiger Schwäche verfaßt worden seien. Brewster hat aber nachgewiesen, daß Newton stets im Besitze seiner vollen Geisteskraft gewesen ist, ausgenommen eine ganz kurze Zeit, als er sich überarbeitet hatte. Dies hat er jedoch vollständig überwunden, und die Abfassung jener Schriften fällt in eine spätere Zeit. Noch wenige Tage vor seinem Tode führte er den Vorsitz in der Gesellschaft der Wissenschaften.

Digitized by Google

Die Fixsterne.

§ 320. Die Bewegungen im Planetensystem waren bis gegen Ende des 18. Jahrhunderts durch Beobachtung aufgeklärt und schließlich durch Newton theoretisch begründet worden. Dagegen galt der Fixsternhimmel bis zu dieser Zeit als etwas ganz unveränderliches. Ganz vereinzelte Beobachtungen, wie z. B. die Entdeckung eines neuen Sternes durch Tycho Brahe (§ 67), deuteten allerdings an, daß Veränderungen nicht ganz ausgeschlossen waren. Aber man hatte längst erkannt, daß die jährliche Bewegung der Fixsterne in Bezug auf die Sonne (§ 29), sowie die Präzession (§ 44) und die Aberration (§ 284) nicht durch die Bewegung der Fixsterne selbst, sondern durch die Bewegung der Erde verursacht wurden, und alle Versuche, die Entfernung der Fixsterne zu ermitteln, waren gescheitert. Zur Erforschung des Fixsternhimmels waren feinere Instrumente erforderlich, als sie damals den Beobachtern zur Verfügung standen, und derjenige, der sie zuerst zuwegebrachte, war ein Mann, der sich anfangs nur als Dilettant neben seinem eigentlichen Berufe mit astronomischen Studien beschäftigte.

§ 321. Wilhelm Herschel wurde 1738 in Hannover geboren, welches damals in Personalunion mit England vereinigt war. Sein Vater, Militärmusiker, war ein gebildeter Mann, seine Mutter eine tüchtige, praktische Frau, allerdings ohne höhere Bildung. Die zahlreichen Kinder waren alle musikalisch, aber nur die Söhne, unter ihnen Wilhelm, hatten Gelegenheit, sich in dieser Beziehung auszubilden. Im Alter von 17 Jahren wurde er Hautboist in der hannoverschen Garde und kam mit dieser nach England. Einige Jahre später gab er seinen Dienst auf, erteilte Musikunterricht, wirkte in Konzerten mit und wurde später Organist in Halifax und dann in Bath.

Fig. 300.

Wilhelm Herschel.

Er gab hier Konzerte, hatte viele Schüler und nahm auf musikalischem Gebiete eine sehr angesehene Stellung ein. Neben seiner musikalischen Tätigkeit, die ihn wohl 14 Stunden am Tage in Anspruch nahm, studierte er in den Abendstunden Sprachen, Mathematik, Optik und Astronomie. Nach dem Tode seines Vaters nahm er seinen jüngeren Bruder Alexander, und einige Jahre später auch seine viel jüngere Schwester Karoline zu sich. Beide sollten ihm bei seinen Arbeiten behilflich sein, der Bruder, der Mechaniker war, beim Schleifen von Spiegeln, die Schwester bei seinen Beobachtungen.

Digitized by Google

Herschel war nämlich bei seinen astronomischen Studien so sehr von dem Wunsche beseelt, die Himmelskörper mit eigenen Augen zu beobachten, daß er nicht eher ruhte, als bis es ihm 1774 gelungen war, sich ein Spiegelteleskop von $5\frac{1}{2}$ Fuß Brennweite anzufertigen. Er betrieb seine Studien mit einem solchen Eifer, daß er sogar die Pausen während der Konzerte benutzte, um die Sterne zu beobachten.

Nachdem ihm der erste Versuch gelungen war, fertigte er ein Teleskop nach dem anderen an. Es wurden Spiegel von 7 Fuß, 10 Fuß, 20 Fuß geschliffen. Das ganze Haus wurde zur Werkstätte, und da er während dieser Tätigkeit nicht ohne geistige Nahrung bleiben konnte, mußte ihm seine Schwester Karoline vorlesen, während er am Tage mit dem Schleifen der Spiegel beschäftigt war. Abends war er dann als Musiker tätig und nachts beobachtete er mit seinen Instrumenten die Sterne. Nur wenige Stunden gönnte er sich Ruhe.

Seine Beobachtungen bestanden jedoch keineswegs in einem neugierigen Umherspähen am Himmel. Er durchmusterte sorgfältig den Fixsternhimmel Stück für Stück und notierte alles, was er über die Stellung, die Lichtstärke und die Farbe der Sterne beobachtete. Auf diese Weise hatte er sich bereits im Jahre 1781 eine solche Sicherheit und Erfahrung im Beobachten erworben, daß er am 13. März im Sternbild der Zwillinge einen Stern bemerkte, der eine größere Scheibe als die übrigen zu haben schien. Er vermutete, daß es ein Komet sei, und es zeigte sich auch alsbald, daß er eine eigene Bewegung besaß. Als seine Bahn genauer untersucht wurde und es sich herausstellte, daß diese annähernd eine kreisförmige war, erkannte er, daß es ein Planet war, der sich außerhalb der Saturnbahn bewegte. Er nannte ihn zu Ehren des Königs den Georgsstern (Georgium sidus). Später wurde ihm jedoch der Name Uranus beigelegt. Jetzt wurde Herschel mit einem Male ein berühmter Mann. Der König ließ ihn nach Greenwich und nach Windsor kommen. Sein Teleskop, welches er hier vorführte, war besser als sämtliche Instrumente der Greenwicher Sternwarte, und der König sowie der königliche Hof wurden nicht müde, mit diesem Teleskop die Sterne zu beobachten. Der König ernannte Herschel zu seinem Hofinstrumentenmacher, und dieser verlegte infolgedessen nebst seiner Schwester Karoline seinen Wohnsitz nach Windsor. Anfangs erhielt er jedoch einen geringen Gehalt, und er mußte so viel Zeit auf seine musikalische Tätigkeit verwenden, daß er sich nur wenig mit astronomischen Studien beschäftigen konnte. Als jedoch der König darauf aufmerksam gemacht wurde, wurden die Verhältnisse sofort anderweitig geregelt, und es wurde namentlich eine größere Summe bewilligt, durch die Herschel in den Stand gesetzt wurde, sein berühmtes 40füßiges Riesenteleskop (Fig. 301) anzufertigen.

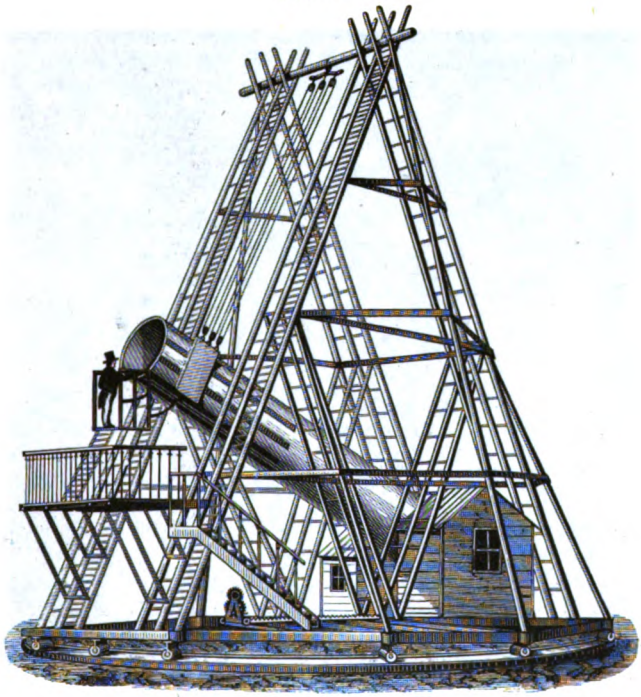
Es folgte jetzt eine für die Astronomie sehr fruchtbare Reihe von Jahren. Herschel heiratete 1783 eine Dame aus vermögender Familie und siedelte nach Slough bei Windsor über. Seine Schwester folgte ihm nach dem neuen

Digitized by Google

Wohnort und entfaltete hier eine bedeutende astronomische Tätigkeit. Sie entdeckte z. B. nicht weniger als acht Kometen.

Herschel selbst entdeckte zwei Monde des Saturn und zwei Monde des Uranus. Ein achter Mond des Saturn und ein dritter und vierter Mond des Uranus wurden erst in der Mitte des 19. Jahrhunderts von

Fig. 301.



Herschels 40füßiges Spiegelteleskop.

Lassel in Liverpool entdeckt. Es war aber namentlich der Fixsternhimmel, den Herschel durchforschte, und er sandte im Laufe der Jahre eine Menge Mitteilungen über seine Entdeckungen an die Royal Society in London.

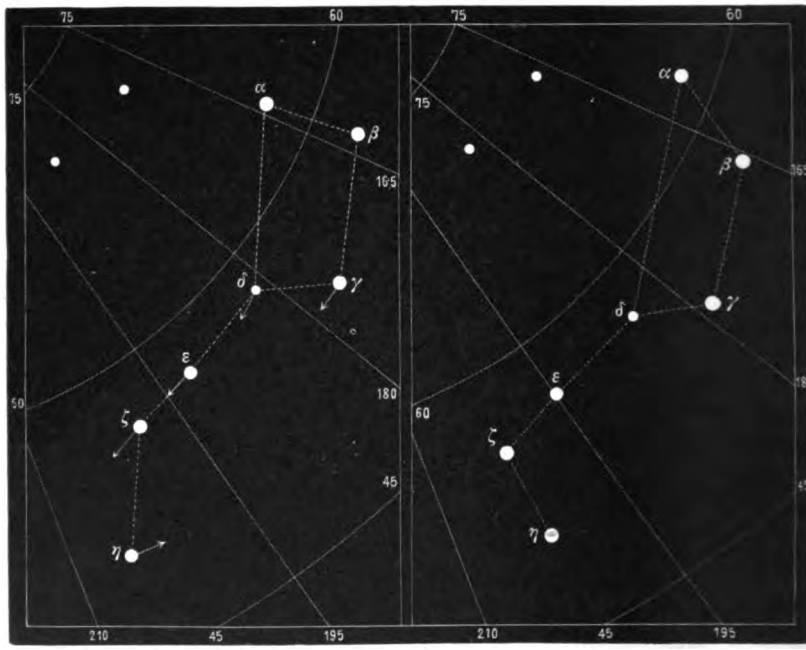
§ 322. Unter Herschels Beobachtungen verwandelte sich der Fixsternhimmel aus einem Firmament, einem unveränderlichen Gewölbe, in eine unermeßliche Sammlung frei schwebender Sonnen. Herschel erkannte durch seine feinen Messungen, daß die Sterne ihre Stellung, wenn auch langsam, verändern. Sie ändern ihre gegenseitige Stellung, aber so langsam, daß man erst nach Jahrtausenden die Veränderung bei unmittelbarer Betrachtung bemerken wird. Bereits früher hatte Halley darauf aufmerksam gemacht, daß Sirius, Arkturus und Aldebaran $^1/_2{}^0$ südlicher zu stehen schienen, als im Katalog des Ptolemäus. In Fig. 302 (a. f. S.) ist der große Bär abgebildet, wie er jetzt aussieht (links) und wie er nach 36000 Jahren aussehen wird

Digitized by Google

(rechts). In der ersten Figur sind die Richtungen, in denen sich die einzelnen Sterne bewegen, durch Pfeile angedeutet.

Außer den Bewegungen der einzelnen Sterne fand Herschel noch eine allgemeine Bewegung, die er durch eine Bewegung des Sonnensystems durch den Raum erklärte. Er fand nämlich, daß die Sterne im Sternbilde des

Fig. 302.



Der große Bär jetzt und nach 36 000 Jahren.

Herkules und dessen Umgebung (Fig. 303) sich sämtlich von einem gewissen Punkte entfernen, der in der Figur mit einem kleinen Kreis bezeichnet ist. Es ist ähnlich, als wenn man im Walde auf ein bestimmtes Ziel losgeht. Die Bäume, welche rechts von diesem Ziel stehen, entfernen sich nach rechts, diejenigen, welche links vom Ziel stehen, entfernen sich nach links, und die Gipfel der Bäume steigen, je mehr man sich nähert, um so mehr in die Höhe. An der entgegengesetzten Stelle des Himmels fand Herschel einen Punkt, gegen den die Sterne zusammengleiten, ebenso wie die Bäume im Walde an derjenigen Stelle, von der wir herkommen, scheinbar zusammenrücken.

§ 323. Bei der starken Vergrößerung von Herschels Teleskop erblickte man vermittelst desselben unzählige Mengen von Sternen. Wenn wir sonst von den „unzähligen" Sternen sprechen, so ist dieser Ausdruck nicht ganz zutreffend, wenn man nur an die mit bloßem Auge sichtbaren Sterne denkt, denn deren Zahl zu ermitteln, bietet keine Schwierigkeit.

Digitized by Google

Man teilt die Sterne nach ihrer Lichtstärke in verschiedene Größenklassen ein. Die hellsten bilden die Sterne erster Größe. Die Sterne siebenter Größe sind nur noch schwierig sichtbar. Jedenfalls gehört ein klarer Himmel und ein gutes Auge dazu, um sie deutlich wahrzunehmen. Die folgenden Klassen sind nur noch im Fernrohr sichtbar, und ihre Zahl ist um so größer, je stärker das Fernrohr vergrößert. Die Anzahl der Sterne der ersten Klassen ist ungefähr die folgende:

Größe:	1.	2.	3.	4.	5.
Zahl:	21	65	200	425	1100
Größe:	6.	7.	8.	9.	
Zahl:	3200	13 000	40 000	142 000.	

Von der ungeheuren Anzahl der Sterne höherer Größenklassen bekommt man eine Vorstellung, wenn man die kleine Stelle im Sternbilde der Zwillinge, Fig. 151, betrachtet, an der man mit bloßem Auge nur 7 Sterne sieht, von denen der hellste ein Stern dritter Größe ist. An derselben Stelle hat man mit einem guten modernen Fernrohr 3205 Sterne bis zur 13. Größenklasse gezählt (Fig. 152). Eine solche Menge von Sternen beobachtet man allerdings nicht in jeder Richtung. Im allgemeinen ist die Anzahl am größten in der Milchstraße. Herschel schätzte sie auf 18 Millionen. Später hat Struve (geb. 1793 in Altona, gest. 1864 in Petersburg) die Anzahl der Sterne, die man mit Herschels 40füßigem Teleskop am ganzen Himmel unterscheiden konnte, auf 20 Millionen geschätzt. Heute schätzt man die Anzahl der mit dem Fernrohre erkennbaren Sterne auf über 80 Millionen. Selbstverständlich hängt aber diese Zahl, wie schon Herschel richtig erkannte, von dem Grade der Vergrößerung des Fernrohres ab, mit dem die Beobachtungen gemacht werden.

Fig. 303.

Der Punkt unter den Sternen, gegen den sich die Sonne bewegt.

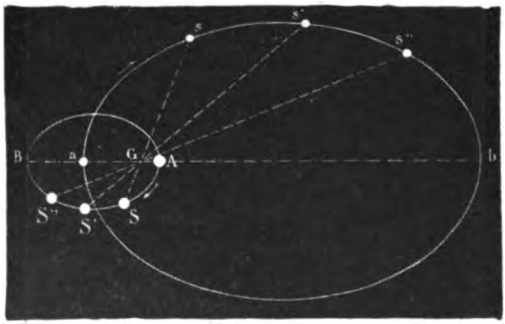
§ 324. Eine weitere Frage ist nun die, welches die Entfernung der Fixsterne ist. Tycho Brahe hatte versucht, diese Entfernung zu ermitteln (§ 70), aber ohne Erfolg, ebenso Bradley (§ 284). Der letztere entdeckte bei diesem Versuche die Aberration des Lichtes. Jetzt unternahm Herschel die Lösung der Frage, aber ebenfalls ohne Erfolg, trotzdem er in seinen Beobachtungen eine Genauigkeit erreicht hatte, wie niemand vor ihm. Dagegen führten seine Bestrebungen zu einer neuen Entdeckung.

Da die vergebens gesuchte Parallaxe (vergl. § 70 und Fig. 53) jeden-

Digitized by Google

falls sehr klein sein mußte, wollte Herschel versuchen, sie durch ein bereits von Galilei vorgeschlagenes Verfahren zu entdecken. Die scheinbare Verschiebung eines Sternes infolge der Bewegung der Erde um die Sonne muß man nämlich am sichersten beobachten können, wenn man den Ort des Sternes mit einem benachbarten, aber unendlich entfernten Stern vergleicht, dessen Verschiebung infolge der Bewegung der Erde gleich Null oder wenigstens verschwindend klein ist im Vergleich mit der Verschiebung (Parallaxe) des Sternes, die man ermitteln will. Herschel wollte, mit anderen Worten, Sternpaare beobachten, die selbst in seinem großen Teleskop dicht nebeneinander standen und für die daher die Lichtbrechung, die Aberration und andere Abweichungen gleich waren. Er beobachtete daher sorgfältig eine Menge solcher Sternpaare und bestimmte den gegenseitigen Abstand und die Stellung der beiden Sterne. Später wiederholte er die Messungen, aber anstatt eine Parallaxe, eine der jährlichen Bewegung der Erde entsprechende Verschiebung zu beobachten, entdeckte er bei mehreren Sternpaaren eine Veränderung der Stellung der beiden Sterne in Bezug aufeinander. Bei weiter fortschreitender Bewegung würden sie einen vollen Umlauf umeinander ausführen. Wie sich die Planeten um die Sonne bewegen oder noch besser, wie sich Erde und Mond, die zusammen sozusagen einen Doppelplaneten bilden, um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, der allerdings innerhalb der Erde liegt (§ 317), bewegen, so bewegen sich die von Herschel entdeckten „Doppelsterne“ im Laufe vieler Jahre um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Herschel hat allerdings von keinem Sternpaare einen vollen Umlauf erlebt, aber im Laufe der Zeit hat man ihn bei vielen Doppelsternen beobachtet. Herschel beobachtete z. B. den Doppelstern ξ im großen Bären in den Jahren 1781, 1803 und 1825. Einen vollen Umlauf hatte der Stern erst im Jahre 1842, also in einer Periode von 61 Jahren gemacht.

Fig. 304.



Bewegung der Doppelsterne.

Auch hier gelten die Keplerschen Gesetze, sowie das Newtonsche Gravitationsgesetz. Die Sterne bewegen sich in Ellipsen um den gemeinsamen Schwerpunkt als Brennpunkt. Die Ellipsen sind oft sehr langgestreckt, was jedoch optische Täuschung sein kann, indem die Bahn von der Seite gesehen wird. Fig. 304 kann eine Vorstellung von der Bewegung solcher Doppelsterne geben. G ist der gemeinsame Schwerpunkt, a und A sind die beiden Sterne in dem Augenblick, wenn sie einander am nächsten sind. Man muß sich vorstellen, daß A eine dreimal so große Masse hat als a, da aG dreimal

Digitized by Google

so groß gezeichnet ist als AG. Die beiden Körper bewegen sich dann so, daß sie gleichzeitig in s und S, in s' und S', in s'' und S'' und in b und B (dem größten Abstande) u. s. w. ankommen.

So entdeckte Herschel, daß einige von den Doppelsternen wirkliche (physische) Doppelsterne sind, zwei Sonnen, die zusammengehören. Andere sind nur sogenannte optische Doppelsterne, d. h. sie stehen zufälligerweise mit der Erde annähernd in gerader Linie, während der zweite von dem ersten vielleicht viel weiter entfernt ist, als der erste von der Erde. Dieser Umstand war es, den Herschel zur Ermittelung der Parallaxe des näheren zu benutzen gedachte. Dies gelang allerdings nicht, dagegen beobachtete und beschrieb er 806 wirkliche Doppelsterne.

Außer den Doppelsternen gibt es auch Sternsysteme, die aus drei, vier und noch mehr einzelnen Sternen bestehen, die zusammengehören und sich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Da Herschel an der Vorstellung festhielt, daß die Fixsterne Sonnen seien, erfuhr unsere Vorstellung über Sonnensysteme bereits durch die Beobachtung der Doppelsterne eine Erweiterung. Bis dahin kannte man nur unser eigenes Sonnensystem mit einem Zentralkörper. Im Weltraum treffen wir aber auch Systeme von zwei, drei und mehr leuchtenden Körpern, die sich umeinander bewegen. Wenn sich in diesen Systemen auch dunkle Körper befinden sollten, so würde man auf diesen Körpern nicht nur, wie auf der Erde, eine Sonne, sondern zuweilen gleichzeitig mehrere Sonnen, vielleicht Sonnen von verschiedener Farbe am Himmel stehen sehen.

§ 325. Wenn auch Herschels Versuch, die Parallaxe der Fixsterne zu messen, nicht gelang, so gab er doch die Hoffnung nicht auf, sich eine Vorstellung von der Größe des Weltalls zu bilden, in das er mit seinem Riesenfernrohr weiter eingedrungen war, als irgend einer vor ihm.

Wir beobachten in verschiedenen Richtungen verschiedene Mengen von Fixsternen, am meisten aber in derjenigen Ebene, in der die dichten Scharen der Milchstraße einen Gürtel um das ganze Himmelsgewölbe herum bilden. Herschel war der Ansicht, daß die Sonne selbst zu einem großen Schwarm gehört, daß sie, mit anderen Worten, einer von den Millionen Sternen ist, aus denen die Milchstraße besteht, und daß die für das bloße Auge sichtbaren Sterne die nächsten Glieder dieses großen Schwarmes sind. Wir sehen sie nur deshalb einzeln, weil es diejenigen sind, die der Erde am nächsten sind.

Um nun die Ausdehnung und die Gestalt dieses Schwarmes zu finden, machte Herschel die Voraussetzung, daß die Zwischenräume zwischen allen Weltkörpern im Durchschnitt gleich groß sind, daß diese also annähernd gleichmäßig im Raum verteilt sind. Richtet man nun das Fernrohr auf die eine oder andere Stelle, so sieht man alle Sterne, die sich in dem Kegel befinden, den das Gesichtsfeld des Fernrohres umfaßt. Umfaßte daher das Gesichtsfeld des Fernrohres an einer Stelle 100, an einer anderen dagegen 800 Sterne, so zog Herschel hieraus den Schluß, daß die Grenze des Schwarmes im letzteren Falle doppelt so weit entfernt sein müsse, als im ersteren, denn

Digitized by Google

wenn der Kegel doppelt so lang ist, so ist sein Inhalt achtmal so groß. Sah man in einer dritten Richtung auf einmal 2700 Sterne, so mußte die Entfernung der Grenze des Schwarmes dreimal so groß sein, wenn der Inhalt 27 mal so groß sein sollte. So ermittelte Herschel die Tiefe unseres Sonnenschwarmes (der Milchstraße) in nicht weniger als 3400 Richtungen. Er veröffentlichte das Resultat dieser „Sondierungen" im Jahre 1785. Später gewann er jedoch die Überzeugung, daß die Voraussetzung der gleichmäßigen Verteilung, die er gemacht hatte, unhaltbar sei.

Er ging nun von einer anderen Voraussetzung aus, nämlich daß alle Sterne gleich stark leuchten. Dann müssen die Sterne erster Größe uns am nächsten sein, die Sterne zweiter Größe etwas weiter entfernt als diese, die Sterne dritter Größe wieder etwas weiter entfernt, u. s. w. Da nun Herschel eine Reihe von Fernrohren von sehr verschiedenem Vergrößerungsvermögen hatte, so konnte er mit dem schwächsten, mit dem man doch mehr Sterne erkennen konnte als mit bloßem Auge, sozusagen einen Faden tiefer sondieren, als mit bloßem Auge. Mit dem folgenden Fernrohr, in dem man mehr Sterne als in dem ersten erblickte, konnte er wieder einen Faden tiefer sondieren, u. s. w. bis zum großen 40 füßigen Teleskop. Wenn nun in einer bestimmten Richtung das Fernrohr Nr. 2 mehr Sterne erkennen läßt, als das Fernrohr Nr. 1, das Fernrohr Nr. 3 aber nicht mehr, als das Fernrohr Nr. 2, so ist mit Nr. 2 die Grenze des Schwarmes an dieser Stelle erreicht.

Herschel sah jedoch ein, daß auch diese Annahme über die gleiche Lichtstärke der Sterne nicht sicher und also die auf diese Annahme begründete Sondierung nicht zuverlässig ist. Dennoch erkennen wir in diesen beiden Versuchen das unermüdliche Bestreben eines großen Forschers, eine Tiefe zu messen, die er allerdings schließlich selbst als bodenlos erklärte. Wenn auch die Methoden nicht zuverlässig sind, so sind sie doch — namentlich wenn beide zugleich benutzt werden — in ähnlicher Weise brauchbar, wie eine Wahrscheinlichkeitsrechnung überhaupt brauchbar ist, und auch heute noch verschaffen wir uns in ähnlicher Weise eine Vorstellung über die Gestalt der Milchstraße. Diese Millionen von Sternen scheinen eine etwas abgeplattete Scheibe zu bilden, die wahrscheinlich in eine Anzahl ringförmiger Teile zerfällt. Wir selbst befinden uns am inneren Rande eines Ringes und sehen daher die Sterne der Milchstraße zu einem Gürtel zusammenfließen. Derselbe ist an der gegenüberliegenden Seite geteilt, und wir können hier durch einen Teil der ringförmigen Öffnung hindurchsehen.

Fig. 305.

Sternhaufen im Herkules.

§ 326. Endlich hat sich Herschel um die Erforschung der Sternhaufen und Nebelflecke große Verdienste erworben. Bereits vor seiner Zeit hatte

Digitized by Google

man ungefähr 120 Nebelflecke beobachtet. Herschel erhöhte die Zahl auf 2500, und mit seinem ausgezeichneten Teleskop fand er, daß sich viele derselben in zahllose Sterne auflösen. Er glaubte, daß dies bei allen Nebelflecken der Fall sein würde, wenn man sie nur mit einem Fernrohr von hinreichender Stärke betrachte. Später kam er jedoch zu einer anderen Auffassung, und neuere Forschungen haben es wahrscheinlich gemacht, daß es allerdings zahlreiche Nebelflecke gibt, die sich, im Fernrohr betrachtet, in Tausende von Sternen auflösen (Fig. 306), daß es aber auch andere gibt, die sogenannten planetarischen Nebel (Fig. 307, a. f. S.), wie sie Herschel nannte, die nicht aus einzelnen Sternen bestehen und die oft eine sehr unregelmäßige Form haben. Was die ersteren betrifft, so glaubte Herschel, daß sie sich weit außerhalb der Milchstraße befänden und selbst als andere Milchstraßen zu betrachten seien, so daß man wieder von einer Milchstraße der Milchstraßen reden könne.

Fig. 306.

Sternhaufen im Centauren.

§ 327. Herschel machte ferner zahlreiche Aufzeichnungen über die Farbe, die wechselnde Lichtstärke der Fixsterne u. dergl. Er brachte über die Fixsterne ein so gründliches Beobachtungsmaterial zusammen und eröffnete so anziehende Gebiete in dieser bis dahin ziemlich leblosen Welt, daß seine Tätigkeit eine nicht geringe Bedeutung dadurch erlangt hat, daß durch sie zahlreiche jüngere Kräfte angeregt wurden, sich der Lösung der von ihm in Angriff genommenen Probleme zu widmen. Herschel starb in demselben Alter wie Newton im Jahre 1822. Seine Schwester Karoline, die viel jünger war (geb. 1750), starb 1848.

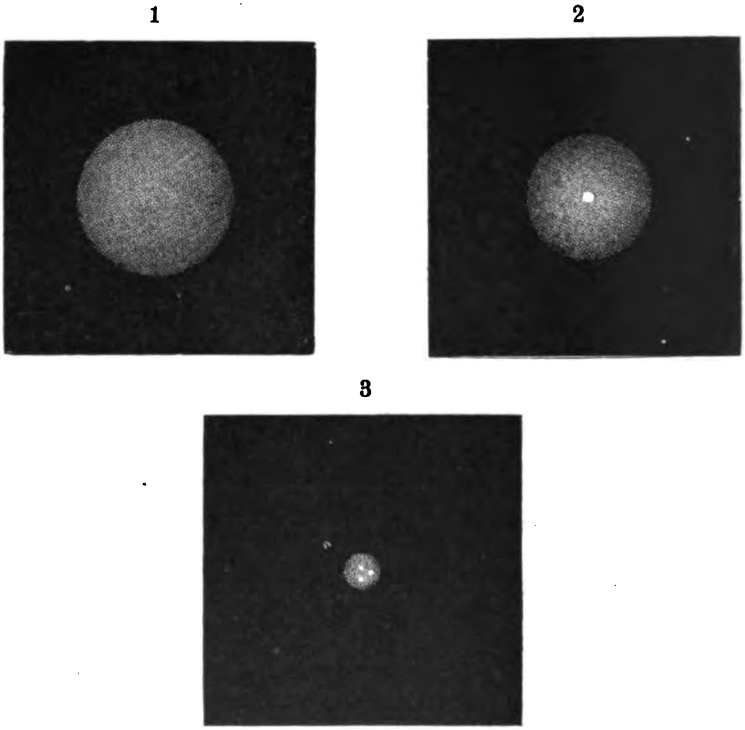
Der einzige Sohn W. Herschels, John Herschel (1792 bis 1871), setzte das vom Vater begonnene Werk in würdiger Weise fort. Er war einer der hervorragendsten Beobachter des 19. Jahrhunderts, namentlich auf dem Gebiete der Doppelsterne und der Nebelflecke. Im Jahre 1834 begab er sich nach dem Kap der guten Hoffnung und beobachtete hier vier Jahre lang den Teil des Himmels, der bei uns unsichtbar ist. Gelegentlich der Krönung der Königin Victoria im Jahre 1838 wurde er in den Adelstand erhoben.

§ 328. Bevor wir weitergehen, wollen wir uns eine Vorstellung davon zu machen versuchen, welchen Grad der Vergrößerung und welche Feinheit der

Digitized by Google

Messung Herschel mit seinen Instrumenten erreicht hatte. Bei seinen Messungen der Doppelsterne handelt es sich oft um eine Bogensekunde und noch weniger. Um eine Vorstellung von der Größe einer Bogensekunde zu bekommen, bedenke man, daß der Mond einen Durchmesser von 30 Minuten,

Fig. 307.



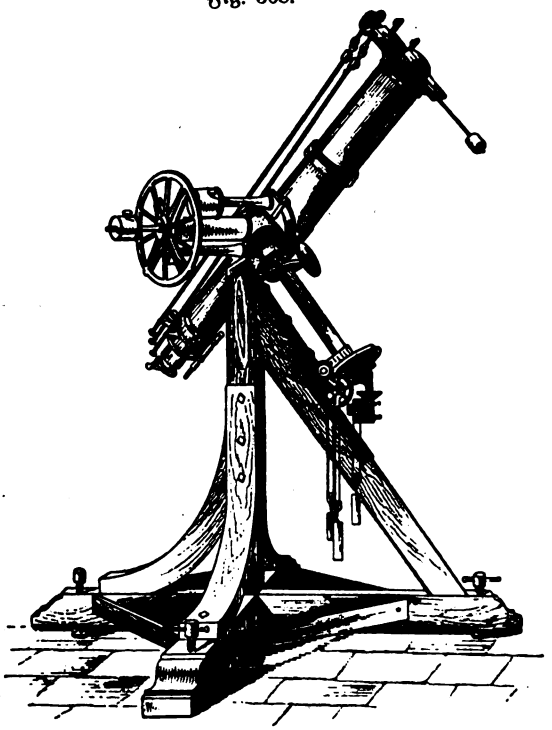
Planetarische Nebel in den Fischen (1), im großen Bären (2) und in der Andromeda (3).

also von 1800 Sekunden hat. Wenn man sich also den Durchmesser des Mondes in 1800 gleiche Teile geteilt denkt, so ist jeder dieser Teile gleich einer Bogensekunde. Um die Feinheit der Messungen in anderer Weise zu veranschaulichen, kann man sich in einer Entfernung von 2 km ein Gebäude von 35 m Länge denken. Dies erscheint dann unter einem Winkel von einem Grad. Einem Winkel von einer Sekunde entspricht also der 3600. Teil von 35 m, also ungefähr 1 cm. Wenn man also aus einer Entfernung von 2 km den Winkelabstand zweier Punkte, die eine gegenseitige Entfernung von 1 cm haben, ermitteln will, so handelt es sich um die Messung eines Winkels von einer Sekunde. So weit ungefähr war Herschel gekommen, aber man mußte noch etwas weiter kommen, wenn es gelingen sollte, die seit Jahrtausenden gesuchte Parallaxe der Fixsterne zu finden.

Digitized by Google

In dieser Hinsicht ist zu bemerken, daß die Optik und die Glasschleiferkunst und damit die Herstellung von Fernrohren während der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts so bedeutende Fortschritte machten, daß die Astronomen seit den zwanziger Jahren mit feineren Instrumenten ausgerüstet waren, als je zuvor. Ausgezeichnete Instrumente gingen aus der Werkstätte von Fraunhofer in München hervor. Dieser konstruierte unter anderen Instrumenten auch ein „Heliometer" für Bessel in Königsberg. Der Name bedeutet „Sonnenmesser", allein das Instrument kann auch zur Bestimmung der Abstände anderer Punkte, die nahe beieinander liegen, wie z. B. der Abstände der Doppelsterne, benutzt werden. Die Objektivlinse des Heliometers (Fig. 308) ist in der Mitte durchgeschnitten, und die beiden halbkreisförmigen Hälften sind in zwei besonderen Metallfassungen so angebracht, daß sie sich vermittelst einer feinen Schraube so verschieben lassen, daß sie mit den Durchmessern aneinander hingleiten. Bei einer geringen Verschiebung bildet jede Hälfte ein besonderes Bild eines Sternes, und je mehr die beiden Hälften gegeneinander verschoben werden, desto größer wird der Abstand der beiden Bilder. Beobachtet man nun z. B. einen Doppelstern, so sieht man im ganzen vier Bilder. Man kann nun die beiden Hälften der Objektivlinse so einstellen, daß das nördliche Bild des einen Paares mit dem südlichen Bilde des anderen Paares zusammenfällt, daß man also im ganzen nur drei Bilder sieht. Dann entspricht die Verschiebung, die an der Schraube abgelesen wird, dem Abstande der beiden Sterne. Auf diese Weise ermöglichte Fraunhofer mit seinem Heliometer eine außerordentlich feine Messung.

Fig. 308.



Heliometer.

§ 329. Friedrich Wilhelm Bessel (Fig. 309, a. f. S.) war 1784 in Minden geboren. Im Alter von 15 Jahren trat er in ein kaufmännisches Geschäft

Digitized by Google

in Bremen ein, verwendete aber bereits hier ſeine freie Zeit auf das Studium der Mathematik und Aſtronomie. Im Jahre 1806 ward er Aſſiſtent an der Sternwarte zu Lilienthal, und 1810 wurde ihm die Aufſicht über den Bau und ſpäter die Direktion der Sternwarte in Königsberg übertragen, an der er bis zu ſeinem Tode, 1846, tätig war, bewundert als ausgezeichneter Theoretiker, umſichtsvoller Forſcher und gründlicher und unermüdlicher Beobachter. Abgeſehen von zahlreichen anderen ausgezeichneten Beobachtungen iſt

Fig. 309.

F. W. Beſſel.

es namentlich die Ermittelung der Parallaxe der Fixſterne, durch die Beſſel ſeinen Namen unſterblich gemacht hat. Die zu ſolchen Beobachtungen erforderlichen Hilfsmittel waren allerdings inzwiſchen ſo vervollkommnet worden, daß auch mehrere andere Beobachter faſt gleichzeitig zum Ziele kamen und ihre Beobachtungen wenig ſpäter als Beſſel veröffentlichten.

§ 330. Beſſel hat die Parallaxe der Fixſterne nach demſelben Verfahren beſtimmt, nach dem bereits W. Herſchel die Parallaxe zu ermitteln

Digitized by Google

versucht hatte, nämlich durch Messung des Abstandes eines Paares optischer Doppelsterne. Es handelte sich hauptsächlich darum, ein Paar zu wählen, bei dem man mit einiger Sicherheit darauf rechnen konnte, daß der eine bedeutend weiter entfernt ist als der andere. Nun ist es nicht unwahrscheinlich, daß von zwei Sternen der hellere auch zugleich der nähere ist. Außer Herschel hatten auch andere Beobachter die Wahl nach diesem Gesichtspunkt getroffen, ohne jedoch zum Ziele zu kommen. Bessel traf seine Wahl nach einem anderen Gesichtspunkte. W. Herschel hatte ja nachgewiesen, daß jeder Stern seine eigene Bewegung hat. Bessel hielt es nun für wahrscheinlich, daß von zwei Sternen derjenige der nächste ist, der sich am schnellsten bewegt. Deshalb wählte er für seine Beobachtungen den Doppelstern Nr. 61 im Schwan. Der eine Stern dieses Paares hatte nämlich eine jährliche Bewegung von fünf Sekunden, und man hatte ihn daher den „fliegenden Stern" genannt. Dem Laien wird allerdings diese Geschwindigkeit nicht sehr bedeutend vorkommen, denn der Stern braucht 350 Jahre, um sich um eine Strecke zu verschieben, die gleich dem scheinbaren Durchmesser des Mondes ist. Bessel nahm nun im Laufe des Jahres 1838 wiederholte Messungen vor, und er konnte am Ende dieses Jahres mitteilen, daß die Parallaxe des Sternes ungefähr $^1/_3$ Sekunde war. Wenn man nun bedenkt, daß der Radius der Erdbahn gleich 20 000 000 Meilen ist und daß diese Entfernung vom Stern 61 im Schwan aus gesehen als ein Bogen von $^1/_3$ Sekunde erscheint, so kann man die Entfernung dieses Sternes leicht berechnen. Es würde aber wenig Sinn haben, diese riesige Entfernung in Meilen anzugeben, fast noch weniger, als wenn man den Umfang der Erde in Millimetern angeben wollte. Selbst die Entfernung der Erde von der Sonne (20 000 000 Meilen) würde noch eine ungeeignete Maßeinheit sein, da die Entfernung des betreffenden Sternes ungefähr gleich einer halben Million solcher Einheiten ist. Man pflegt daher diese riesigen Entfernungen oft dadurch auszudrücken, daß man angibt, welche Zeit das Licht braucht, um sie zu durchlaufen. Das Licht, welches in einer Sekunde 40 000 Meilen durchläuft (§ 282 bis 288), kommt vom Mond zu uns in $1^1/_4$ Sekunden, von der Sonne in ungefähr 8 Minuten, vom Stern 61 im Schwan in $8^1/_2$ Jahren.

Zu derselben Zeit, als Bessel den Stern im Sternbilde des Schwans beobachtete, beobachtete Henderson zu demselben Zwecke am Kap der guten Hoffnung den prachtvollen Stern α im Sternbilde des Centauren. Es stellte sich heraus, daß dieser Stern der nächste von allen ist, deren Entfernung man ermittelt hat. Die wichtigsten Fixsterne, deren Entfernungen bekannt sind, sind in der Tabelle (a. f. S.) zusammengestellt.

Hieraus ersieht man, daß einige von den Sternen, deren Entfernung man ermittelt hat, zu den hellsten Sternen des Himmels gehören. Dies steht mit der Auffassung Herschels in Einklang, daß die hellsten Sterne die nächsten sein müssen, wenn man annimmt, daß alle Sterne durchschnittlich gleich hell sind. Diese Annahme ist sicher nicht in allen Fällen berechtigt, aber im großen und ganzen ist sie doch zulässig. Wenn man die Entfernung

Digitized by Google

	Größe	Parallaxe	Entfernung		Seitliche Bewegung	
			in Erdbahnradien	in Lichtjahren	Bogensekunden jährlich	Meilen in der Sekunde
α im Centauren . .	1	0,913	225 970	3,5	3,58	2,5
61 im Schwan . . .	5	0,374	550 900	8,7	5,12	8,7
Sirius	1	0,150	1 375 100	21,3	1,23	5,1
ε im großen Bären .	3	0,133	1 550 000	24,4	0,75	3,5
Arkturus	1	0,127	1 628 000	25,5	2,25	11,0
Capella	1	0,046	4 484 000	70,5	0,46	6,3

der schwach leuchtenden Sterne unter der Voraussetzung berechnet, daß die geringe Lichtstärke nur durch die Entfernung bedingt ist, so erhält man für die durchschnittliche Entfernung der Sterne die folgenden Werte:

Sterne	1.	Größe	15 Lichtjahre
„	2.	„	28 „
„	3.	„	43 „
„	4.	„	61 „
„	5.	„	85 „
„	6.	„	120 „
„	10.	„	700 „

Die entferntesten Sterne der Milchstraße sind nach dieser Schätzung so weit entfernt, daß das Licht, welches wir jetzt von ihnen bekommen, vor 4000 Jahren ausgesandt worden ist. Die Zuverlässigkeit einer derartigen Schätzung ist aber natürlich nicht sehr groß, und sie würde noch geringer sein, wenn man sie auf die noch weiter entfernten Nebelflecke anwenden wollte.

§ 331. W. Herschel hatte die scheinbare Bewegung einer großen Anzahl von Sternen gemessen, und diese Arbeiten sind natürlich bis auf die Gegenwart mit verbesserten Instrumenten fortgesetzt worden. Wenn es nun gelungen ist, die Parallaxe eines Sternes und folglich seine Entfernung zu ermitteln, ist es leicht, auch die Geschwindigkeit des Sternes zu berechnen. So legt z. B. der Stern 61 im Schwan, der eine Parallaxe von 0,374″ und eine jährliche Bewegung von 5,12″ hat, im Jahre ungefähr 274 000 000 Meilen oder in der Sekunde 8,7 Meilen zurück. Hierbei ist natürlich vorausgesetzt, daß sich der Stern senkrecht zur Sehlinie bewegt. Wenn er sich außerdem noch nähert oder entfernt, so ist seine Geschwindigkeit natürlich noch größer.

Die beiden letzten Kolumnen in der obenstehenden Tabelle geben die entsprechenden Geschwindigkeiten für einige andere Sterne an. Wie man sieht, haben die Sonnen — unsere eigene Sonne einbegriffen (§ 322) — eine

Digitized by Google

Geschwindigkeit von einigen Meilen in der Sekunde, ähnlich wie die Erde (4 Meilen), die anderen Planeten und die Kometen. Aber infolge der riesigen Entfernung erscheint die Geschwindigkeit gering, ebenso wie die Geschwindigkeit eines Schnellzuges gering erscheint, wenn der Zug aus einer Entfernung von einigen Meilen gesehen wird. Die Entfernung der Fixsterne ist aber so groß, daß man kaum im Verlaufe von Jahrtausenden eine Veränderung in der gegenseitigen Stellung derselben bemerkt.

§ 332. Sirius leuchtet, wie man durch Messung ermittelt hat, 5 400 000 000 mal schwächer als die Sonne. Da nun Sirius 1 375 000 mal so weit entfernt ist, muß seine Lichtstärke (vergl. § 83) $\frac{1\,375\,000^2}{5\,400\,000\,000}$ oder 350 mal so stark sein als die Lichtstärke der Sonne. Wenn man sich also seinen Glanz nicht stärker denken will als den unserer Sonne, so muß seine Oberfläche 350 mal so groß, sein Durchmesser nahezu 19 mal so groß und sein Rauminhalt mehr als 6000 mal so groß sein als die entsprechenden Dimensionen der Sonne. Und doch erscheint in der ungeheuren Entfernung Sirius wie jeder andere Fixstern als Punkt. Wenn Sirius nicht stärker leuchtete als die Sonne, so würde er von der Erde aus nur von einem scharfen Auge und unter günstigen Umständen als ein Stern sechster Größe gesehen werden.

Daß andere Sonnen, die der unsrigen an Größe nicht nachstehen, auch von Planeten umgeben sein können, muß als etwas an und für sich sehr Wahrscheinliches bezeichnet werden. Wenn diese Begleiter Körper wie die Erde und die übrigen Planeten sind, dann ist die Hoffnung, daß wir sie jemals wahrnehmen könnten, jedenfalls eine sehr geringe. Denn wenn selbst die Sonne nur als ein Stern sechster Größe erscheinen würde, so würde das Licht, welches selbst ein Planet von der Größe des Jupiter aussendet, auch mit den besten Fernrohren nicht bemerkt werden können. Aber man muß darauf vorbereitet sein, daß draußen im Weltall manches anders ist als in unserem Sonnensystem, und gerade am Sirius hat man eine in dieser Hinsicht äußerst interessante Beobachtung gemacht.

Als Bessel die Eigenbewegung des Sirius entdeckt und gefunden hatte, daß er eine gekrümmte Bahn beschreibt, zog er den Schluß, daß er sich um einen anderen, nicht leuchtenden Körper bewegen müsse. Dasselbe nahm er vom Procyon an. Verschiedene Astronomen setzten die Beobachtungen fort und bestimmten die Bahnen so genau als möglich. Versuche, den Begleiter des Sirius im Fernrohr zu beobachten, waren jedoch zunächst erfolglos. Erst im Jahre 1862 wurde er von Clark, der von jenen Vermutungen gar nichts wußte, aufgefunden, indem er jene Stelle des Himmels mit einem ungemein stark vergrößernden Fernrohr von $18^1/_2$ Zoll Objektivdurchmesser beobachtete. Auch der Begleiter des Procyon ist aufgefunden worden, und zwar 1873 von O. Struve. Sirius und sein Begleiter bewegen sich umeinander in 50 Jahren, Procyon und sein Begleiter in 40 Jahren.

§ 333. Seit der Zeit Herschels ist die Unermeßlichkeit des Fixstern-

Digitized by Google

himmels und zugleich auch die Mannigfaltigkeit der Erscheinungen an demselben immer mehr erkannt worden. Weitere Untersuchungen dieser fernen Sonnensysteme, die nicht immer aus einer, sondern zuweilen aus zwei, drei und mehr Sonnen bestehen, namentlich die Untersuchungen mit dem Spektroskop (vergl. den Abschnitt über die Natur des Lichtes) haben gezeigt, daß in jenen Welten, die Billionen von Meilen entfernt sind, dieselben Naturgesetze gelten wie bei uns, sowohl die Keplerschen Gesetze, als gewisse Gesetze, welche die Natur des Lichtes betreffen. Dagegen sind die näheren Umstände, unter denen diese Gesetze dort zur Geltung kommen, viel mannigfaltiger als in unserem Sonnensystem. Hat z. B. ein System drei Sonnen von verschiedener Größe, von verschiedener Temperatur und verschiedener Atmosphäre, die auf das von den Sonnen ausgehende Licht einwirken, so werden auf der Oberfläche eines Planeten, der diesem System angehört, ganz andere Verhältnisse herrschen als auf der Erde. Man denke nur an das Auf- und Untergehen verschiedener Sonnen, an die verschiedenen Beleuchtungen und Dämmerungserscheinungen, an die Zeitverhältnisse, welche sich aus der Bewegung verschiedener Sonnen ergeben, u. s. w.

Digitized by Google

Der Schall.

Digitized by Google

Digitized by Google

Der Schall.

§ 334. Zu den Wiegengeschenken, die sich in der Kindheit des Menschengeschlechtes leicht und unmittelbar dem Gebrauche darboten, gehört der Schall. Der Mensch besitzt nicht nur ein Organ zum Wahrnehmen des Schalles, das Ohr, sondern auch ein Organ zum Hervorbringen des Schalles, die Stimme, und ohne über die Einrichtung oder die physikalische Wirkung dieser Organe nachzudenken, hat er dieselbe vermöge seiner geistigen Fähigkeit in Gebrauch genommen, ebenso wie umgekehrt der Gebrauch derselben die Entwickelung der geistigen Fähigkeiten gefördert hat.

Aber sehr frühzeitig zeigt sich doch hier das menschliche Erfindungsvermögen. Nicht ohne Grund hat man die Musik die älteste von allen

Fig. 310.

Harfen- und Flötenspiel bei den alten Ägyptern.

Künsten genannt. Im ersten Buch Mose 4, 21 heißt es, daß Jubal der Stammvater der Geiger und Pfeifer gewesen sei, und soweit die Geschichte und Sage zurückreicht, haben alle Völker musikalische Instrumente gehabt. Unter diesen Instrumenten waren dieselben drei Hauptarten vertreten, die auch heute noch in Gebrauch sind, nämlich erstens solche, die, wie die Trommel, das Becken, der Triangel und die Glocke, nur einen Ton hervorbringen, zweitens Saiteninstrumente, die verschiedene Töne hervorbringen, wie die Zither, die Harfe, die Violine und das Piano, und drittens Blasinstrumente. Alle drei Arten von Instrumenten finden sich über die ganze Erde in den

Digitized by Google

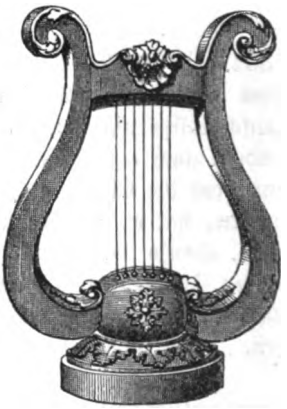
von den ältesten Völkern hinterlassenen Abbildungen, und ebenso trifft man sie heute bei allen auch noch so wenig entwickelten Völkern.

Oft wird vom göttlichen Ursprung der Musik erzählt, was sich leicht durch den bezaubernden Einfluß erklärt, den die Musik auf das menschliche

Fig. 311.

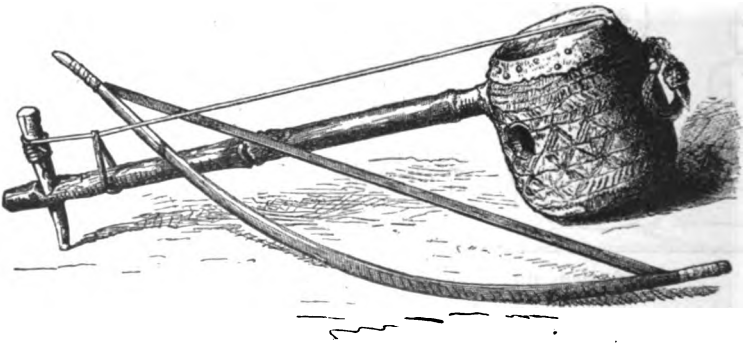
Hebräische Harfe.

Fig. 312.



Griechische Lyra.

Fig. 313.



Afrikanische Geige.

Gemüt ausüben kann. Wir lesen von der Einwirkung, die Davids Harfenspiel auf Saul ausübte, und wir hören von dem halbwilden Afrikaner, der sich liebkosend über sein Instrument beugt, während er ihm seine schwachen Töne entlockt.

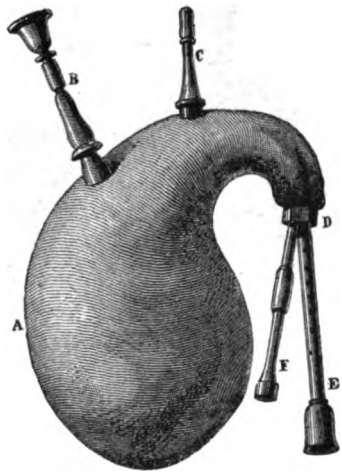
§ 335. Die Erfahrung hat den Menschen frühzeitig gelehrt, wie die Instrumente gebaut werden müssen, wie lang die Saiten sein müssen u. dergl.

Digitized by Google

Dieſe Vorſchriften wurden wie ſo vieles andere im Altertum als göttliche Überlieferung angeſehen und in Ehren gehalten. Die Zahlenverhältniſſe, welche mit den Tonhöhen in Zuſammenhang ſtehen, wurden zuerſt von Pythagoras (§ 24) unterſucht.

Es wird erzählt, er habe im Vorübergehen bemerkt, daß der Klang der Hämmer in einer Schmiede eine muſikaliſche Quart, Quint und Oktav bildeten, und er habe gefunden, daß das Gewicht der kleineren Hämmer $^3/_4$, $^2/_3$ und $^1/_2$ vom Gewicht des großen war. Dies veranlaßte ihn, eine Saite durch verſchiedene Gewichte, ſowie Saiten von verſchiedener Länge durch dasſelbe Gewicht zu ſpannen, um zu unterſuchen, wie ſich der Ton der Saite ändert. Der Bericht hierüber iſt erſt mehrere Jahrhunderte ſpäter aufgezeichnet worden und daher nicht zuverläſſig, aber er iſt inſofern intereſſant, als darin von Verſuchen die Rede iſt, etwas, was ſonſt im griechiſchen Altertum faſt ganz unbekannt iſt (vergl. § 140). Pythagoras fand, daß, wenn eine Saite einen gewiſſen Ton gibt, eine Saite von derſelben Art und von derſelben Spannung die höhere Quart, Quint und Oktav gibt, wenn die Länge $^3/_4$, $^2/_3$ und $^1/_2$ von der Länge der erſten iſt. Wenn überhaupt zwei gleich ſchwere und gleich ſtark geſpannte Saiten Töne geben ſollen, die gut zuſammen klingen — die einen wohlklingenden Akkord bilden — ſo müſſen die Längen derſelben in einem einfachen Verhältnis zueinander ſtehen. Dies ſtimmte gut mit der von Pythagoras gemachten Beobachtung, daß Schönheit auch auf anderen Gebieten, z. B. in der Baukunſt, durch einfache Zahlenverhältniſſe bedingt iſt. — Pythagoras ſoll zu den ſieben Saiten der Lyra die achte (Oktav) hinzugefügt haben.

Fig. 314.



Italieniſcher Dudelſack.

Ariſtoteles erwähnt die genannten Verhältniſſe und fügt hinzu, daß ſie auch für die Töne von Pfeifen und deren Längen gelten. Auch iſt ihm bekannt, daß die Töne aus Schwingungen beſtehen, die von dem tönenden Körper ausgehen und ſich durch die Luft bis in das Ohr fortpflanzen.

§ 336. Genauer wurden dieſe Verhältniſſe von dem franzöſiſchen Jeſuiten Merſenne (geb. 1588, geſt. 1648; § 177 und 240) in einem Werk behandelt, welches 1636 erſchien. Er erkannte, daß die Tonhöhe ganz allein von der Schwingungszahl abhängt, und ſtellte für die Schwingungen einer Saite den Satz auf, daß die Anzahl der Schwingungen der Länge und der Quadratwurzel des ſpezifiſchen Gewichtes der Saite umgekehrt proportional, der Quadratwurzel des ſpannenden Gewichtes dagegen direkt proportional iſt. Wenn z. B. eine Saite doppelt ſo viel Schwingungen machen ſoll als eine

Digitized by Google

andere, so kann dies in einer dreifachen Weise erreicht werden, entweder indem man sie halb so lang macht, oder indem man sie viermal so leicht macht, oder indem man sie mit dem vierfachen Gewicht spannt, während die anderen Verhältnisse unverändert bleiben.

Mersenne fand ferner, daß für Pfeifen dasselbe Gesetz gilt wie für Saiten, d. h. daß sich die Schwingungszahlen der Töne, die sie hervorbringen, umgekehrt wie ihre Längen verhalten. Eine Pfeife von doppelter Länge erzeugt einen Ton von der halben Schwingungszahl. Der Ton einer offenen Pfeife hat die doppelte Schwingungszahl des Tones einer geschlossenen (gedeckten) Pfeife von gleicher Länge.

Fig. 315.

Mersenne.

Viel eingehender wurden die Gesetze der Saitenschwingungen ein Jahrhundert später untersucht, als eine ganze Reihe der großen Mathematiker des 18. Jahrhunderts (Taylor, Joh. und Dan. Bernoulli, d'Alembert, Euler und Lagrange) den Gegenstand rein theoretisch behandelten. Vor allen Dingen gab Taylor eine genaue und absolute Formel, vermittelst deren man die Schwingungszahl einer Saite berechnen kann, wenn man die Länge, das Gewicht und die Spannung der Saite kennt[1]).

Brook Taylor, geb. 1685 in der Nähe von London, studierte in Cambridge, wurde im Alter von 27 Jahren Mitglied der Gesellschaft der Wissenschaften und zwei Jahre später Sekretär derselben. Außer der Abhandlung, in der er die erwähnte Formel ableitet, hat er zahlreiche andere Arbeiten, teils rein mathematischen (Taylorscher Satz), teils mathematisch-physikalischen Inhaltes veröffentlicht. Er starb bereits 1731.

§ 337. Gleichzeitig oder noch etwas früher war es einem Franzosen gelungen, die Schwingungszahl durch den Versuch genau zu bestimmen.

---

[1]) Ist die Länge der Saite l, das Gewicht der Längeneinheit p, das spannende Gewicht P und die Fallbeschleunigung g (§ 149), so ist die Schwingungszahl

$$n = \frac{1}{l}\sqrt{\frac{P \cdot g}{p}}.$$

Wird z. B. eine Stahlsaite von 1000 mm Länge und 1 qmm Querschnitt durch ein Gewicht von 7,5 kg oder 7500 g gespannt, so ist das Gewicht eines Millimeters 0,0075 g (spez. Gewicht des Stahles 7,5) und die Schwingungszahl

$$n = \frac{1}{1000}\sqrt{\frac{7500 \cdot 10000}{0{,}0075}} = 100.$$

Digitized by Google

Joseph Sauveur war 1653 in La Flèche geboren. Er hörte schlecht und konnte infolgedessen im Alter von sieben Jahren noch nicht sprechen. Trotzdem wurde er auf dem Gebiete der Akustik einer der größten Experimentatoren seiner Zeit.

Er besuchte zunächst die Jesuitenschule, die seinerzeit auch Mersenne und Descartes besucht hatten. Er studierte anfangs Theologie, später aber Mathematik und Physik und verdiente sich seinen Unterhalt durch Erteilung von Unterricht. Auch auf dem Gebiete der Ingenieurwissenschaften war er tätig, und seinen Leistungen auf diesem Gebiete verdankte er es, daß er 1696 zum Mitglied der Akademie gewählt wurde. Die Wahl beantwortete er sozusagen damit, daß er sich von diesem Augenblicke an einem einzigen Zweige der Wissenschaft widmete, und zwar demjenigen, der für ihn am schwierigsten zugänglich zu sein schien, der Lehre vom Schall, die er trotz seines mangelhaften Gehörs wie kaum ein anderer gefördert hat. Er starb 1716.

§ 338. Orgelbauer hatten öfters beobachtet, daß beim Zusammenklingen von zwei tiefen Tönen, die nahe beieinander liegen, eigentümliche Stöße oder Schwebungen auftreten. In einem Augenblick war der Ton stark, im nächsten Augenblick schwach, dann wieder stark, dann schwach u. s. w. in einem bestimmten Takt. Aber man wußte die Erscheinung nicht zu erklären.

Als Sauveur hiervon hörte, erkannte er sofort den Zusammenhang. Macht z. B. der eine Ton 34 und der andere 35 Schwingungen in der Sekunde, so befinden sie sich am Anfang und am Ende der Sekunde in gleichem Schwingungszustande und verstärken sich daher gegenseitig, in der Mitte der Sekunde dagegen befinden sie sich in entgegengesetztem Schwingungszustande und heben sich daher auf. In diesem Falle erleidet der Ton im Laufe jeder Sekunde eine Verstärkung und eine Schwächung. Macht der eine Ton 34 und der andere 36 Schwingungen in der Sekunde, so verstärken sie sich am Anfang, in der Mitte und am Ende der Sekunde und schwächen sich in den Zwischenzeiten. Es entstehen also zwei Stöße in der Sekunde. Ist der Unterschied der Schwingungszahlen gleich drei, so entstehen drei Stöße in der Sekunde u. s. w. Um diese Stöße zu hören, braucht man selbstverständlich nicht musikalisch zu sein, und Sauveur erkannte in dieser Erscheinung ein ebenso willkommenes als interessantes Mittel, zu entscheiden, ob zwei Töne genau übereinstimmen oder nicht.

Sauveur benutzte die Erscheinung nicht nur zur Bestimmung des Unterschiedes der Schwingungszahlen zweier Schallquellen, sondern auch zur Ermittelung der absoluten Schwingungszahl. So fand er, daß zwei von seinen Orgelpfeifen von ungefähr 5 Fuß Länge gerade einen Stoß in der Sekunde hervorbrachten. Eine genaue Messung der Längen der Pfeifen ergab, daß sich diese Längen wie 100 zu 101 verhielten. Wird nun die Schwingungszahl der längeren mit x bezeichnet, so muß die Schwingungszahl der kürzeren $x + 1$ sein, da sie einen Stoß in der Sekunde geben. Da sich aber die Schwingungszahlen umgekehrt wie die Längen verhalten, gilt die Proportion

Digitized by Google

$$\frac{x + 1}{x} = \frac{101}{100}.$$

Also ist $x = 100$. Sauveur empfahl, diesen Ton von 100 Schwingungen in der Sekunde als Normalton zu benutzen. Er ist jedoch als solcher nicht in Gebrauch gekommen. Für die Musik ist es ja auch unwesentlich, ob der Normalton eine so runde Schwingungszahl hat oder nicht. Selbst heute ist noch nicht überall derselbe „Kammerton" in Gebrauch. In einigen Ländern benutzt man einen Ton von 435, in anderen einen solchen von 440 Schwingungen als Normalton für die Stimmung der musikalischen Instrumente.

Mit Hilfe der Stöße erklärte 1759 der französische Mathematiker Lagrange die sogenannten Tartinischen Töne. Ein italienischer Musiker Tartini soll einige Jahre vor Sauveurs Tod bemerkt haben, daß bei dem Zusammenklingen zweier ziemlich verschiedener Töne zugleich noch ein dritter tieferer Ton gehört wird. Je größer nämlich der Unterschied der Schwingungszahlen der beiden Töne ist, welche Stöße hervorbringen, desto schneller folgen diese aufeinander. Ist der Unterschied 10, so hört man in jeder Sekunde 10 Stöße, was den Eindruck eines rollenden Geräusches macht. Ist der Unterschied noch größer, so geht das Rollen in einen Ton über. Macht z. B. der eine Ton 400 und der andere 600 Schwingungen in der Sekunde, so entstehen in der Sekunde 200 Stöße, die von einem feinen Ohr als ein Ton von 200 Schwingungen empfunden werden.

Wir kommen später auf Sauveur zurück. Zunächst müssen wir gewisse andere Eigenschaften des Schalles betrachten.

§ 339. Man hat nicht selten Gelegenheit zu beobachten, daß ein Schlag, der in einiger Entfernung mit einem Hammer, einer Pflasterramme u. dergl. ausgeführt wird, etwas später gehört als gesehen wird, daß also der Schall eine gewisse Zeit braucht, um sich fortzupflanzen. Die Erscheinung war den Völkern des Altertums natürlich bekannt, und sie wird auch von Aristoteles erwähnt. Nach seiner Meinung pflanzen sich tiefe Töne langsamer fort als hohe.

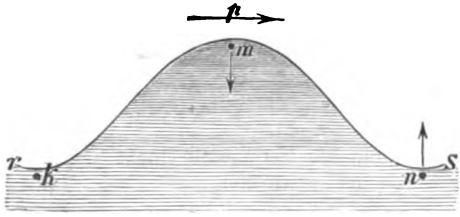
Daß diese Annahme falsch war, wurde von Pierre Gassendi (1592 bis 1655) nachgewiesen. Er ließ in großer Entfernung eine Kanone und eine Flinte abfeuern und maß die Zeit zwischen der Wahrnehmung des Lichtblitzes und des Schalles. Er fand, daß der tiefe Knall der Kanone und der hohe Knall der Flinte das Ohr genau in derselben Zeit erreichen. Gassendi ist somit der erste, von dem man weiß, daß er eine wirkliche Messung der Schallgeschwindigkeit ausgeführt hat, wenn auch seine Messung nicht sehr genau war. Im Laufe des Jahrhunderts wurde diese Geschwindigkeit auch von anderen Beobachtern ermittelt, aber die Ergebnisse der verschiedenen Versuche wichen erheblich voneinander ab. Gassendi fand 1473, Mersenne 1380, die Accademia del Cimento 1077, Boyle 1126, Dom. Cassini, Huygens, Picard und Römer 1097, Flamsteed und Hallen 1071 Pariser Fuß. Die Verschiedenheit der Zahlen hat ihren Grund wohl

Digitized by Google

zum Teil in mangelhafter Ausführung der Messungen, zum Teil aber wahrscheinlich auch in dem Zustande der Luft, auf den von den meisten Beobachtern nicht die erforderliche Rücksicht genommen wurde.

Wichtige Beobachtungen über die Fortpflanzung des Schalles wurden von William Derham (1657 bis 1735) gemacht. Er war Theologe, interessierte sich aber auch sehr für die Naturerscheinungen und wurde Mitglied der Gesellschaft der Wissenschaften. Er fand — was die Accademia del Cimento in Abrede gestellt hatte —, daß der Schall mit dem Winde schneller fortschreitet als gegen den Wind. Er führte den Beweis, daß sich Töne von verschiedener Höhe gleich schnell fortpflanzen. Ein Musikstück wird ja auch in der Entfernung richtig gehört und nicht so, als ob die tieferen Töne zu spät ankämen. Er fand, daß der Schall eines Pistolenschusses nach hinten ebenso schnell fortschreitet als nach vorn, und daß sich der Schall nach unten und nach oben ebenso schnell fortpflanzt wie in horizontaler Richtung. Dagegen fand er, daß die Stärke des Schalles nicht unter allen Umständen dieselbe, sondern daß sie an einem warmen Sommertage geringer ist als an einem kalten Wintertage. Aber merkwürdigerweise fand Derham nicht, daß diese Umstände auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles Einfluß haben. Der erste, der eine Beobachtung in dieser Richtung machte, war der berühmte italienische Arzt Graf Bianconi (1717 bis 1781). Er fand auf einer sehr großen Standlinie, daß sich die Geschwindigkeiten, mit denen sich der Schall eines Schusses im Sommer bei 35° C. Wärme und im Winter bei —1,5° Kälte fortpflanzt, wie 76 zu 79 verhalten. Auch Condamine (§ 278) fand die Geschwindigkeit des Schalles im hochgelegenen Quito geringer als im wärmeren Cayenne. Durch Beobachtungen von Benzenberg (§ 286) wurde 1811 endgiltig festgestellt, daß sich der Schall in warmer Luft schneller fortpflanzt als in kalter.

Fig. 316.



Das Fortschreiten einer Welle.

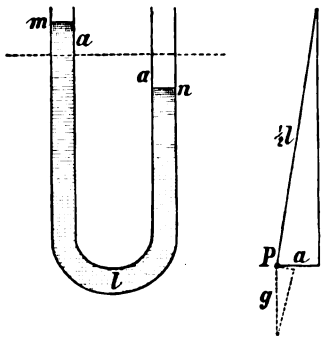
§ 340. In diese Untersuchungen, an denen sich außer den genannten noch viele andere Gelehrte beteiligten, griff auch Newton in seinen „Prinzipien“ (§ 297) ein. Er behandelt in diesem Werke das Fortschreiten einer Welle im Wasser und in der Luft.

Wenn *rps* (Fig. 316) eine Wasseroberfläche vorstellt, die aus irgend einem Grunde augenblicklich bei *p* höher als bei *s* ist, so wird das Wasserteilchen *m* sinken, während das Teilchen *n* nach oben getrieben wird. Newton betrachtet nun die Bewegung des Wassers in einem gebogenen Rohr (Fig. 317, a. f. S.) von der Länge *l*, in dem das Wasser in einem bestimmten Augenblick in dem einen Schenkel um die Höhe *a* über und im anderen Schenkel um ebenso viel unter der Ruhelage steht. Das Wasser wird sich nun in Bewegung setzen, die Ruhelage mit einer gewissen Geschwindigkeit erreichen,

Digitized by Google

diese infolge der Trägheit überschreiten und sich nach der anderen Seite hin um ebenso viel von der Ruhelage entfernen (ohne Rücksicht auf den Reibungswiderstand). Die treibende Kraft ist augenblicklich die Wirkung der Schwerkraft auf die Wassermasse von der Höhe $2a$. Durch diese Kraft wird aber die ganze Masse l in Bewegung gesetzt. Die Masse bewegt sich daher nicht mit der Beschleunigung g, sondern nur mit der Beschleunigung $\frac{2a}{l} \cdot g$ oder $\frac{2ag}{l}$. Denkt man sich nun ein Fadenpendel von der Länge $\frac{1}{2}l$, d. h. einen Körper P, der an einem Faden von der angegebenen Länge hängt und der augenblicklich um die Strecke a aus der Ruhelage entfernt ist, so wirkt auf diesen Körper nicht die volle Schwerkraft beschleunigend, sondern nur der Bruchteil $\frac{a}{\frac{1}{2}l}$ derselben (das punktierte Dreieck ist dem großen Dreieck ähnlich). Also ist die Beschleunigung $\frac{a}{\frac{1}{2}l} \cdot g = \frac{2ag}{l}$. Auf den Körper P wirkt also dieselbe beschleunigende Kraft wie auf das Wasser in dem Rohre. Daher muß das Wasser die Ruhelage in derselben Zeit erreichen wie das Pendel. Nach der doppelten Zeit steht das Wasser im Schenkel links am tiefsten und im Schenkel rechts am höchsten, und das Pendel hat eine ganze Schwingung von links nach rechts gemacht.

Fig. 317.



Bewegung des Wassers in einem gebogenen Rohr.

Stellt nun Fig. 316 eine Wasseroberfläche vor, auf der die Bewegung von links nach rechts fortschreitet, so muß m sinken und n steigen wie in dem Rohr, und dies muß im wesentlichen nach demselben Gesetze vor sich gehen, nur daß die Wassersäule zwischen m und n, die in Bewegung gesetzt werden muß, keine bestimmt vorgeschriebene Form hat wie in dem Rohre. Die Höhe der Wassersäule ist jetzt der vertikale Abstand der Punkte m und n. Die horizontale Entfernung dieser beiden Punkte ist eine halbe Wellenlänge, da unter der Wellenlänge der Abstand zweier Wellenberge oder zweier Wellentäler zu verstehen ist. Wenn m nach unten gekommen ist, ist k durch eine neue Welle nach oben getrieben worden, und jetzt ist es das Teilchen k, welches m wieder nach oben treibt. Ist m oben angekommen, so befindet sich die Oberfläche des Wassers wieder in demselben Zustande, mit dem wir unsere Betrachtung begannen. Während dieser ganzen Zeit ist die Welle erst bis n und dann noch einmal um dieselbe Strecke, also um eine ganze Wellenlänge fortgeschritten. In derselben Zeit hat das Pendel von der Länge $\frac{1}{2}l$ eine Schwingung nach rechts und dann eine Schwingung nach links gemacht. Ein

Digitized by Google

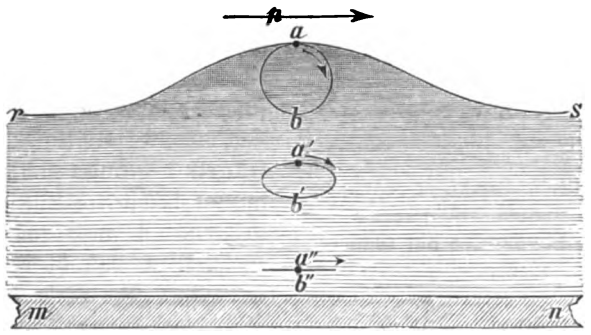
Pendel von vierfacher Länge, also von der Länge $2\,l$, würde in derselben Zeit nur eine Schwingung von links nach rechts gemacht haben. Man sieht also, daß die Wellen auf einer Flüssigkeit um eine ganze Wellenlänge ($2\,l$) in derselben Zeit fortschreiten, in der ein Pendel von derselben Länge ($2\,l$) eine einzelne Schwingung macht.

Beispiel. Haben die Wellen eines bestimmten Systems eine neunmal so große Länge als die Wellen eines anderen Systems, so pflanzen sich die ersteren Wellen in einer dreimal so langen Zeit als die letzteren um eine Wellenlänge fort, denn ein neunmal so langes Pendel hat eine dreimal so große Schwingungszeit. Wenn aber die ersteren Wellen den neunfachen Weg in der dreifachen Zeit zurücklegen, so müssen sie sich dreimal so schnell wie die letzteren fortpflanzen.

Es zeigte sich jedoch, daß an der Newtonschen Formel noch etwas zu berichtigen war, indem namentlich auf die Tiefe der Flüssigkeit Rücksicht genommen werden mußte. Aber im großen und ganzen war die Sache richtig, und Newton hatte auch hier den Mathematikern des folgenden Jahrhunderts ein Gebiet für weitere Bearbeitung eröffnet.

§ 341. Wenn man bedenkt, daß es die Bewegung der Wassersäule, Fig. 316, ist, die die Wellenbewegung erzeugt, so erkennt man, daß sich die einzelnen Wasserteilchen an einer gewissen Stelle abwärts, an einer anderen

Fig. 318.



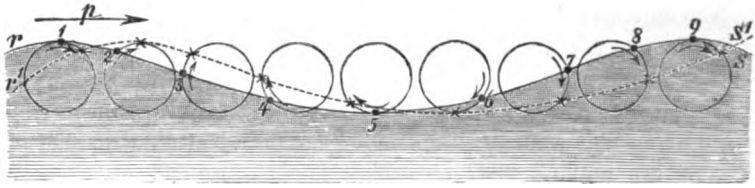
Bewegung der Wasserteilchen in der Weberschen Wellenrinne.

seitswärts und an einer dritten aufwärts bewegen. Der Physiker Wilhelm Weber (II, § 242) hat zusammen mit seinem älteren Bruder, dem Physiologen Ernst Weber (1795 bis 1878) die Wellenbewegung studiert. Sie bedienten sich bei ihren Untersuchungen einer langen Rinne, deren Wände aus Glas bestanden, so daß man die Bewegung des Wassers von der Seite beobachten konnte. Sie ließen im Wasser kleine Partikelchen von gleicher Schwere wie das Wasser, z. B. Torfpartikelchen, schweben und beobachteten die Bewegung dieser Partikelchen durch ein Mikroskop. Die Wellen erzeugten sie durch ein Glasrohr, vermittelst dessen man an dem einen Ende der Rinne

Digitized by Google

etwas Wasser in die Höhe saugen und dann wieder herabfallen lassen konnte. Es zeigte sich, daß ein Torfpartikelchen und folglich auch ein Wasserteilchen während des Vorübergehens eines Wellenberges und eines Wellentales eine kreisförmige Bahn beschreibt, und zwar so, daß das Wasserteilchen vorwärtsgeht, wenn es sich an der höchsten Stelle seiner Bahn, d. h. auf der Spitze des Wellenberges befindet (*a*, Fig. 318, a. v. S.), daß es aber zurückgeht, wenn es sich an der tiefsten Stelle seiner Bahn, d. h. auf dem Boden eines Wellentales befindet. Es zeigte sich ferner, daß die Bahnen Ellipsen waren. Die obersten

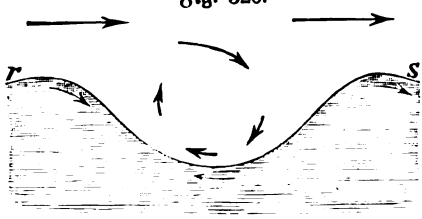
Fig. 319.



Bewegung der einzelnen Wasserteilchen in einer Wasserwelle.

waren ziemlich genau kreisförmig, weiter nach unten waren sie flacher, und am Boden waren sie gerade Linien, in denen sich die Wasserteilchen hin- und herbewegten. Aus der Bewegung der einzelnen Wasserteilchen erklärt sich nun leicht die ganze Wellenbewegung.

Fig. 320.



Die Wirkung des Windes auf Wasserwellen.

In Fig. 319 sind auf den kreisförmigen Bahnen von neun Wasserteilchen diejenigen Stellen bezeichnet, in denen sich die Wasserteilchen in einem bestimmten Augenblicke befinden. Die Welle schreitet von links nach rechts fort und das Wasserteilchen 1 befindet sich augenblicklich an der höchsten Stelle seiner Bahn, während 2 noch um $^1/_8$, 3 um $^1/_4$ u. s. w. von dieser Stelle entfernt ist. Die Welle hat in diesem Augenblicke die Form 1, 2, 3 . . . 9. Aber nach kurzer Zeit ($^1/_8$ Schwingungszeit) ist 2 in die von 1, 3 in die von 2 u. s. w. eingenommene Stellung gekommen, d. h. die ganze Welle hat sich etwas nach rechts (in die durch eine punktierte Linie bezeichnete Stellung) verschoben.

Wenn nun der Wind in derselben Richtung weht, in der die Wellen fortschreiten, so wirkt der Wind, wie leicht einzusehen ist, auf die Wellen verstärkend, da er die Bewegung der auf den Spitzen der Wellenberge befindlichen Wasserteilchen beschleunigt (Fig. 320). In den Wellentälern dagegen wirkt der Wind nicht ebenso stark in derselben Richtung. Ja es kann in einer solchen Vertiefung ein kleiner Wirbelwind entstehen, der auf dem Boden des Tales in entgegengesetzter Richtung wie der eigentliche Wind, also in derselben Richtung weht, in der sich die Wasserteilchen an dieser Stelle bewegten.

Digitized by Google

Da also der Wind die Bewegung der Wasserteilchen verstärkt, wenn diese sich an der höchsten Stelle ihrer Bahn befinden, sie aber jedenfalls nicht um ebenso viel verzögert, sondern sie möglicherweise noch verstärkt, wenn sie sich an der tiefsten Stelle befinden, so wird der Wind die Wellen mehr und mehr vergrößern.

Die zuerst entstehenden kleinen Wellen setzt dagegen der Wind durch die Adhäsion der Luft an die Oberfläche des Wassers in Bewegung. Dasselbe findet auf der Oberfläche der einzelnen großen Wellen statt. Diese ist daher bei windigem Wetter niemals glatt, sondern gekräuselt. In diesen kleineren Wellen hat der Wind eine Menge von Angriffspunkten. Das Fortschreiten der Wellenberge wird daher stärker beschleunigt als das Fortschreiten der Wellentäler, was schließlich dazu führen kann, daß die Welle sich „bricht“ und in das Wellental hinabstürzt.

Dies geschieht nicht, wenn sich auf der Oberfläche des Wassers ein dünnes Ölhäutchen befindet. Ein Tropfen Öl kann sich über eine große Wasserfläche ausbreiten. Hierdurch wird aber die Adhäsion zwischen der Luft und der Flüssigkeit vermindert, so daß die feinen Kräuselwellen nicht entstehen. Dann fehlen aber für den Wind auf den Wellenkämmen die Angriffspunkte und die Wirkung des Windes steigert sich daher nicht leicht bis zu dem Grade, daß eine Brechung der Wellen eintritt. Man gießt daher nicht selten von einem Schiffe, welches bei stürmischer See vor dem Winde segelt, etwas Öl auf das Wasser. Das Meer ist dann hinter dem Schiff, von wo die Wellen kommen, nicht gekräuselt, und die Wahrscheinlichkeit, daß eine Welle das Schiff erreicht, sich bricht und auf das Deck niederstürzt, ist daher vermindert.

§ 342. Anders verhält es sich mit der Brechung der Wellen, die man überall an einer Küste beobachtet, wenn die Wellen auf den Strand laufen.

Der englische Astronom George Airy (1801 bis 1892), der viele schöne Arbeiten auf den Sternwarten in Cambridge und Greenwich ausgeführt hat, hat auch die Wellenbewegung im Wasser einer mathematischen Behandlung unterzogen und nachgewiesen, daß das Newtonsche Gesetz für die fortschreitende Bewegung der Wellen nur unter der Voraussetzung gilt, daß das Wasser im Verhältnis zur Wellenlänge sehr tief ist. In diesem Falle sind die Bahnen der Wasserteilchen in allen Tiefen Kreise, aber die Größe der Kreise nimmt mit der Tiefe sehr schnell ab, so daß in einem Abstande von der Größe einer Wellenlänge von der Oberfläche der Durchmesser der Kreise nur $^1/_{535}$ vom Durchmesser an der Oberfläche ist.

Airy zeigte ferner, daß die Bahnen der Wasserteilchen die von Weber beobachtete Gestalt annehmen, wenn die Tiefe des Wassers im Verhältnis zur Wellenlänge gering ist. Die fortschreitende Geschwindigkeit der Welle ist aber jetzt der Quadratwurzel aus der Wassertiefe proportional. Da nun die Wassertiefe unter einem Wellenberge wesentlich größer ist als unter einem Wellental, so muß der Berg schneller fortschreiten als das Tal, und die Folge davon kann sein, daß sich die Welle überstürzt, wenn sie an Stellen

Digitized by Google

kommt, wo die Wassertiefe gering ist und der Unterschied der Tiefe unter einem Berg und unter einem Tal sich stärker geltend macht. Dasselbe gilt für die Ebbe- und Flutwelle, die selbst im Vergleich mit den Tiefen des Ozeans, also namentlich auch mit den verhältnismäßig geringen Tiefen der Nordsee ungeheuer lang ist. Daher ist die Ebbe von der nachfolgenden Flut durch

Fig. 321.

Flutwelle im Amazonenstrom.

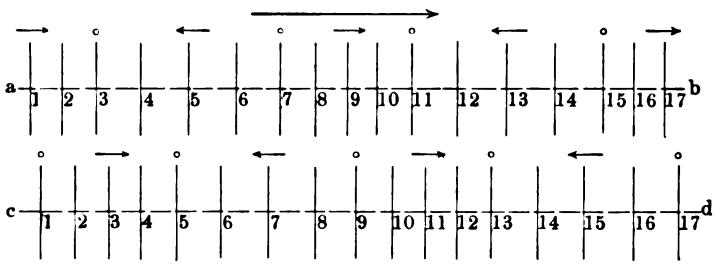
einen kürzeren Zeitraum getrennt, als die Flut von der nachfolgenden Ebbe. Ja an manchen Stellen, wo sich die Flutwelle eine lange Strecke in seichtem Wasser fortgepflanzt hat, kann die Flut so schnell auf die Ebbe folgen, daß die Flutwelle in das Ebbethal hineinstürzt. Wenn nun die Flut außerdem noch dadurch verstärkt wird, daß sie in keilförmige Flußmündungen eindringt, so kann die Fluterscheinung furchtbare Wirkungen hervorbringen (Fig. 321).

§ 343. In einer horizontal fortschreitenden Luftwelle bewegen sich die einzelnen Luftteilchen nicht aufwärts und abwärts, sondern so wie die Wasserteilchen am Boden der Weberschen Rinne vorwärts und rückwärts. Infolgedessen entstehen Verdichtungen und Verdünnungen, wie durch Fig. 322 veranschaulicht wird. Jedes einzelne kleine Stück der Linie *ab* sei die Bahn eines Luftteilchens, und der Pfeil *p* bezeichne die Richtung, in welcher die Welle fortschreitet. Das Luftteilchen 1 befindet sich augenblicklich in der Mitte seiner Bahn und bewegt sich in der Richtung, welche durch den kleinen Pfeil angedeutet ist. Das Teilchen 2 ist in seiner Bewegung gegen das erste

Digitized by Google

etwas zurück, das Teilchen 3 noch mehr. Dieses befindet sich in seiner Bahn am weitesten links. Das Teilchen 4 hat den äußersten Punkt links noch nicht erreicht, 5 ist in der Mitte der Bahn, bewegt sich aber nach links, u. s. w. Die Luftteilchen sind am nächsten beieinander bei 1, 9, 17 . . ., also da, wo sich die einzelnen Teilchen in derselben Richtung wie die ganze Welle bewegen. Am weitesten voneinander entfernt sind die Teilchen bei 5, 13 . . ., d. h. da,

Fig. 322.



Fortpflanzung der Luftwellen.

wo sie sich in entgegengesetzter Richtung wie die Welle bewegen. In der Linie *cd* sind die Luftteilchen in denjenigen Lagen gezeichnet, in denen sie sich $^1/_4$ Schwingungszeit später befinden. Jetzt sind die Teilchen am dichtesten beieinander bei 3, 11 . . ., am weitesten voneinander entfernt bei 7, 15 . . . Die Welle ist um $^1/_4$ Wellenlänge weitergegangen, u. s. w.

§ 344. Die Geschwindigkeit, mit der diese Bewegung fortschreitet, ist die Geschwindigkeit des Schalles, für die man durch Beobachtung den Wert 1100 Fuß oder 330 Meter gefunden hatte (§ 339). Newton hat gezeigt, daß sich die Geschwindigkeit des Schalles auch auf theoretischem Wege ermitteln läßt, und zwar für die Fortpflanzung des Schalles in jedem beliebigen Körper. Denkt man sich von dem betreffenden Körper eine Säule von 1 m Höhe, so wird diese Säule durch ihr eigenes Gewicht etwas zusammengedrückt werden, aber je nach der Art der betreffenden Substanz in verschiedenem Grade. Wenn man die Größe dieser Zusammendrückung, die einen geringen Bruchteil eines Meters beträgt, kennt, so kann man die Geschwindigkeit des Schalles in diesem Körper berechnen. Newton hat bewiesen, daß die Geschwindigkeit des Schalles in einem Körper, wenn die Kompression mit *e* bezeichnet wird, durch die Formel $\sqrt{\frac{g}{e}}$ ausgedrückt wird.

Es ist nicht zu verwundern, daß es für die Geschwindigkeit des Schalles eine so einfache und allgemein giltige Formel gibt. Eine Entwickelung dieser Formel kann hier nicht gegeben werden. Man kann sich aber leicht davon überzeugen, daß durch die beiden Buchstaben, welche sie enthält, alle Umstände zum Ausdruck gebracht werden, von denen die Geschwindigkeit des Schalles abhängt. Es ist zu vermuten, daß sich die Verdichtung in einem Körper um so schneller fortpflanzt, je größer der Widerstand ist, den der Körper

Digitized by Google

einer Zusammendrückung entgegengesetzt, und je leichter der Körper ist. Die Geschwindigkeit des Schalles wird also um so größer sein, je geringer die Zusammendrückung e ist, die er durch sein eigenes Gewicht erleidet. — Diese Zusammendrückung ist ja nun offenbar um so größer, je größer die Anziehungskraft der Erde ist. Anderseits muß die Geschwindigkeit des Schalles ausschließlich von der Natur des Stoffes abhängen. Sie muß z. B. auf dem Monde dieselbe sein wie auf der Erde. Auf dem Monde würde allerdings die Zusammendrückung durch das eigene Gewicht nur $^1/_6\, e$ sein. Da aber auch die Schwerkraft hier nur $^1/_6\, g$ ist, so bleibt das Verhältnis, welches für die Schallgeschwindigkeit maßgebend ist, unverändert. Die Formel gibt die Geschwindigkeit des Schalles für die Sekunde an, weil g die Geschwindigkeit bedeutet, die ein fallender Körper in einer Sekunde erlangt.

Will man nun die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft berechnen, so muß zunächst der Wert von e ermittelt werden. Man denke sich 1 cbm Luft unter dem gewöhnlichen Luftdruck, also so, als ob es mit einer Quecksilbersäule von 0,760 m belastet wäre. Das Gewicht der Luftsäule ist $\frac{1}{10\,500}$ oder 0,000 095 vom Gewicht eines Kubikmeters Quecksilber (§ 263). Die Luft wird also im Verhältnis $\frac{760\,000}{760\,095}$ oder 0,999 875 zusammengedrückt. Die Luftsäule von 1 m Höhe wird also um 0,000 125 oder $\frac{1}{8000}$ verkürzt. Dies ist der Wert von e. Da nun g ungefähr 10 m ist, so ist $g/e = 80\,000$. Die Quadratwurzel aus dieser Zahl ist 283. Man erhält also vermittelst der Formel als Geschwindigkeit des Schalles in der Luft 283 m (ungefähr 900 Fuß).

Dieser Wert ist nur ungefähr $^5/_6$ des durch Beobachtung gefundenen Wertes. Man hat sich lange den Kopf zerbrochen, wo der Grund dieser Abweichung zu suchen sei, denn die mathematische Begründung der Formel war allem Anschein nach unanfechtbar. Newton selbst machte die Annahme, daß die Luftatome ungefähr $^1/_6$ des Raumes ausfüllen und daß der Schall keine Zeit braucht, um sich durch die Atome selbst fortzupflanzen. Der Schall durchlief nach dieser Annahme in einer Sekunde die 900 Fuß zwischen den Atomen und die 200 Fuß in den Atomen, also im ganzen 1100 Fuß. Die Bemühungen mehrerer Mathematiker des 18. Jahrhunderts, die Sache aufzuklären, hatten keinen Erfolg. Der wahre Grund der Erscheinung wurde erst im Jahre 1816 von Laplace angegeben.

§ 345. Pierre Simon Laplace, geb. 1749, begann seine Laufbahn als Mathematiker und kam als solcher nach Paris, wo er Mitglied der Akademie der Wissenschaften wurde. Unter Napoleon wurde er Minister und Kanzler. Auch wurde er von Napoleon in den Grafenstand erhoben. Unter Ludwig XVIII. wurde er Pair und Marquis. Er starb 1827 in Paris.

Laplace hat in mancher Hinsicht die von Newton begonnenen

Digitized by Google

theoretischen Arbeiten erweitert und fortgesetzt, so auch die mathematische Bestimmung der Schallgeschwindigkeit. Wenn die Luft zusammengedrückt wird, so erwärmt sie sich (II, § 172), und wenn sie sich ausdehnt, so kühlt sie sich ab. Laplace weist nun darauf hin, daß es infolgedessen in einer Verdichtungswelle wärmer und in einer Verdünnungswelle kälter ist als in der ruhigen Luft. Hierdurch bekommt die Luft keine höhere Mitteltemperatur, aber eine höhere Elastizität. Denn die Wärme in der Verdünnungswelle macht hier den Druck noch größer, und die Kälte in der Verdichtungswelle macht hier den Druck noch schwächer, als er sonst sein würde. Die Fortpflanzung des Druckes wird infolgedessen stärker. Die Elastizität der Luft wird gesteigert, ohne daß die mittlere Dichtigkeit derselben verändert wird. Indem Laplace diesen Umstand mit in Rechnung zog, fand er für die Geschwindigkeit des Schalles einen Wert, der mit der Erfahrung vollständig im Einklang steht.

Bei 0° ist diese Geschwindigkeit 1059 Fuß, und sie nimmt für jeden Grad um ungefähr 2 Fuß (0,6 m) zu. Daß die älteren Messungen der Schallgeschwindigkeit so schlecht übereinstimmende Resultate lieferten, hat seinen Grund zum Teil darin, daß man den Einfluß der Temperatur nicht berücksichtigt hatte.

§ 346. Die Newtonsche Formel hat den großen Vorzug, daß man die Schallgeschwindigkeit in jedem beliebigen Stoff berechnen kann, wenn man nur die Zusammendrückbarkeit und das spezifische Gewicht kennt, wenn man also weiß, um wieviel eine Säule des Körpers von 1 m Höhe sich selbst zusammendrückt.

Da alle Luftarten in gleichem Grade zusammendrückbar sind (Boylesches Gesetz, § 259), so muß die Zusammendrückung, die eine Luftsäule durch ihr eigenes Gewicht erleidet, dem spezifischen Gewicht der Luftart proportional sein. Wenn das spezifische Gewicht gering ist, so ist auch die Zusammendrückung durch das eigene Gewicht gering, die Geschwindigkeit des Schalles also groß. Wasserstoff ist ungefähr 15 mal so leicht als Luft. Daher wird in der Formel für die Schallgeschwindigkeit der Nenner 15 mal so klein, die Zahl unter dem Wurzelzeichen also 15 mal so groß als für Luft. Die Wurzel selbst, also die Schallgeschwindigkeit im Wasserstoff, ist also ungefähr viermal so groß als die Schallgeschwindigkeit in der Luft. Genau ist sie bei 0° gleich 4044 Fuß (1266 m). In Kohlensäure, die schwerer als Luft ist, ist die Schallgeschwindigkeit gleich 833 Fuß (261 m).

§ 347. Man hat auch die Zusammendrückbarkeit vieler Flüssigkeiten und fester Körper gemessen und kann also auch die Geschwindigkeit des Schalles in diesen Körpern berechnen. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist für verschiedene Stoffe, bei denen eine direkte Messung der Schallgeschwindigkeiten möglich ist, durch die Beobachtung bestätigt worden.

Eine sorgfältige Messung der Schallgeschwindigkeit in Wasser wurde 1827 von Colladon und Sturm auf dem Genfer See ausgeführt. Jeder der beiden Beobachter begab sich zur Ausführung des Versuches in ein Boot.

Digitized by Google

Von dem einen der beiden Boote hing eine Glocke in das Wasser hinab, die vermittelst eines Hammers angeschlagen werden konnte. Gleichzeitig wurde durch die Bewegung des den Hammerstiel bildenden Winkelhebels eine brennende Lunte in ein Häufchen Pulver gesenkt. So wurde gleichzeitig ein Lichtsignal durch die Luft und ein Schallsignal durch das Wasser abgesandt (Fig. 323 u. 324). Die beiden Boote lagen einige Meilen voneinander entfernt, und der Beobachter im zweiten Boote beobachtete vermittelst eines in das Wasser versenkten Hörrohres und einer Sekundenuhr den Zeitunterschied zwischen der Wahr-

Fig. 323.

Colladon und Sturms Messung

nehmung des Lichtblitzes und der Wahrnehmung des Schalles. Da die Zeit, welche das Licht zum Durchlaufen einer so kurzen Strecke braucht, verschwindend klein ist, so ist die beobachtete Zeit diejenige, welche der Schall zum Durchlaufen der Strecke braucht. Als Geschwindigkeit des Schalles im Wasser ergab sich aus diesem Versuche der Wert 4572 Fuß (1435 m), der von dem aus der Zusammendrückbarkeit des Wassers ($e = 0{,}000\,004\,65$) berechneten Werte (1453 m) nur wenig abweicht.

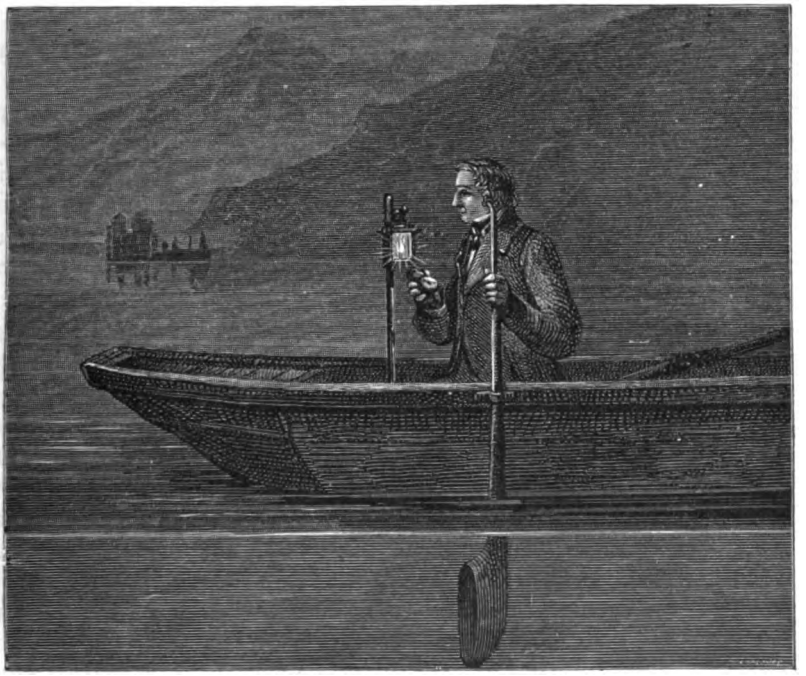
Im Meerwasser ist die Geschwindigkeit des Schalles etwas größer, ungefähr 4700 Fuß (1475 m) und je nach dem Salzgehalt und natürlich auch nach der Temperatur etwas verschieden.

Digitized by Google

Am Meeresufer kann man einen Schuß, der von einem entfernten Punkt der Küste oder von einem Schiff abgegeben wird, zuweilen doppelt hören. Der erste Schall hat sich durch das Wasser, der zweite durch die Luft fortgepflanzt.

§ 348. Der französische Physiker Jean Baptiste Biot (1774 bis 1862) hat einen ähnlichen doppelten Schall am Ende eines eisernen Rohres von 951 m Länge wahrgenommen, wenn gegen das andere Ende ein Schlag mit dem Hammer ausgeführt wird. Der zuerst ankommende Schall pflanzt

Fig. 324.



der Schallgeschwindigkeit im Wasser.

sich offenbar durch das Eisen, der zweite durch die Luft im Rohre fort. Biot ermittelte so genau wie möglich die Zeit zwischen der Ankunft des ersten und des zweiten Schalles und berechnete die Geschwindigkeit des Schalles im Eisen. Er fand, daß sie gleich 3460 m, also zehnmal so groß als die Schallgeschwindigkeit in der Luft ist. Spätere Messungen an einem Telegraphendraht von mehr als einer halben Meile Länge haben zu einem ähnlichen, aber etwas größeren Resultat geführt.

Da sowohl das spezifische Gewicht, als auch die Zusammendrückbarkeit der Körper von der Art der Bearbeitung (Ziehen, Hämmern, Gießen, Glühen, Härten u. s. w.) abhängt, so hängt auch die Geschwindigkeit des Schalles in

Digitized by Google

den Körpern von dieser Art der Bearbeitung ab. Der mittlere Wert der Schallgeschwindigkeit ist für Zinn 2500 m, für Silber 2760 m, für Kupfer 3760 m, für Stahl 5000 m und für Kiefernholz 5800 m. Ein 20 m langer Balken aus Kiefernholz wird also vom Schall annähernd in $^1/_{300}$ Sekunde durchlaufen.

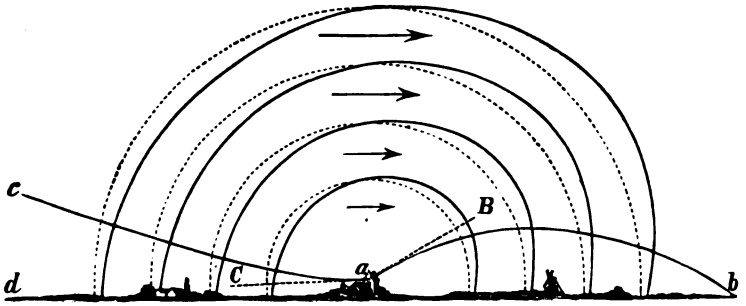
§ 349. Wenn man in einem Punkt einer ruhigen Wasseroberfläche eine Störung hervorbringt, z. B. durch einen Steinwurf, so pflanzt sich die Störung natürlich nach allen Richtungen mit derselben Geschwindigkeit fort und es entstehen die bekannten kreisförmigen Wellen, die von dem betreffenden Punkt ausgehen und die um so schwächer werden, je weiter sie sich von dem Punkt entfernen. Ebenso wird eine Störung an einem einzelnen Punkte in der Luft, z. B. ein Knall, sich gleichmäßig nach allen Richtungen fortpflanzen. Es werden von jenem Punkte kugelförmige Wellen ausgehen, die um so schwächer werden, je weiter sie fortschreiten. Die Fortpflanzungsrichtungen stehen überall auf der Wellenfläche senkrecht. Daß dies so sein muß, ist leicht einzusehen, denn die verschiedenen Teile der Wellenfläche haben dieselbe Dichtigkeit und es ist deshalb kein Grund vorhanden, weshalb sich die Bewegung von einem Teil der Wellenfläche zu einem anderen Teil derselben Wellenfläche fortpflanzen sollte. Wenn aber durch irgend einen Umstand die Form der Wellenfläche verändert wird, so ändert sich auch die Fortpflanzungsrichtung. Dies kann ganz überraschende Erscheinungen zur Folge haben. Man hat Beispiele, daß Töne in auffallend großer Entfernung gehört worden sind, und anderseits ist es vorgekommen, daß das Abschießen von Gewehren in verhältnismäßig sehr geringer Entfernung nicht gehört worden ist.

Es ist bekannt, daß man in der Richtung, in welcher der Wind weht, besser hört, als in der entgegengesetzten Richtung, und man begnügt sich wohl mit der Erklärung, daß in der Richtung des Windes zu der Geschwindigkeit des Schalles noch die Geschwindigkeit des Windes hinzukommt. Daß diese Erklärung unzureichend ist, erkennt man aber leicht, wenn man bedenkt, daß sich die Bewegung der Luft mit einer Geschwindigkeit von 10 m in der Sekunde schon als ein ziemlich starker Wind bemerkbar macht. Ob sich aber der Schall statt mit einer Geschwindigkeit von 330 m mit einer Geschwindigkeit von 340 oder 320 m fortpflanzt, je nachdem er mit dem Winde oder gegen den Wind fortschreitet, kann offenbar auf die Stärke des Schalles keinen erheblichen Einfluß ausüben. Der englische Physiker John Tyndall (geb. 1820, gest. 1893) hat die Erscheinung in folgender Weise erklärt. Die Geschwindigkeit des Windes ist in der Höhe fast immer größer, als unmittelbar an der Erdoberfläche (Fig. 325). Infolgedessen erleiden die Wellenflächen, die in ruhiger Luft Kugelflächen sein würden (die punktierten Linien), eine Formveränderung, indem sie oben in der Windrichtung (in der Richtung der Pfeile) stärker fortschreiten, als an der Erdoberfläche. Dadurch nehmen sie die durch die ausgezogenen Linien bezeichnete Form an. Da nun die Fortpflanzung in jedem Punkt senkrecht zur Wellenfläche stattfindet, so wird der Schall, der vom Punkt *a* in der Richtung *a C* ausgeht, eine Person im Punkt *d* nicht erreichen,

Digitized by Google

sondern in der Richtung ac über sie hinweggehen. Die Person im Punkt d hört nichts von dem Schall. Dagegen pflanzt sich der Schall, der in der Richtung aB ausgeht, längs der Linie ab fort, die überall auf der Wellenfläche senkrecht steht. Der Schall wird also von einer Person im Punkt b wahrgenommen werden, und sämtlicher Schall, der von a aus in Richtungen unter aB ausgeht, wird in ähnlicher Weise abgelenkt und trifft die Erdober-

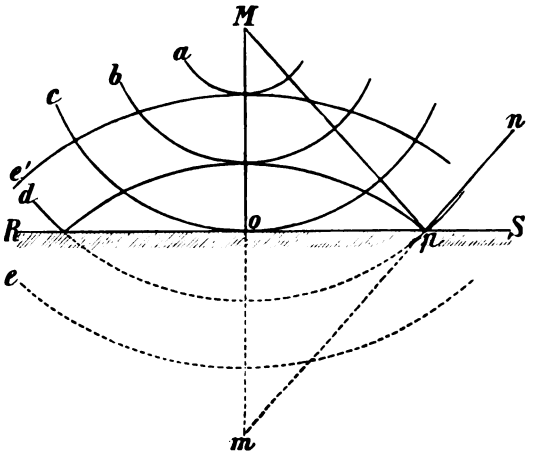
Fig. 325.



Fortpflanzung des Schalles mit dem Wind und gegen den Wind.

fläche an verschiedenen Punkten zwischen a und b. Dieser Teil der Erdoberfläche erhält also mehr Schall, als ihm eigentlich zukommt, nämlich sämtlichen Schall, der sich bei windstillem Wetter über den ganzen Raum unter aB verbreitet haben würde.

Fig. 326.



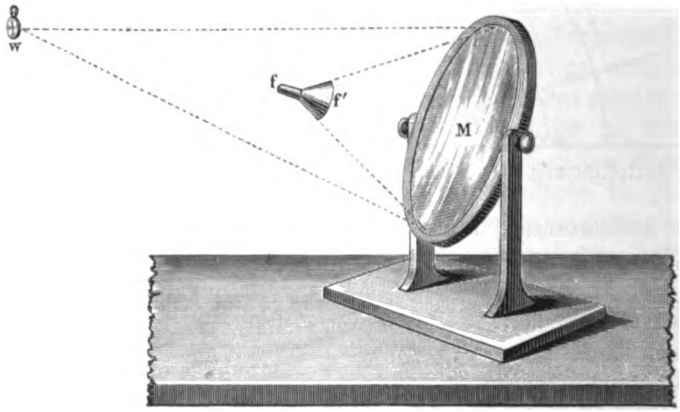
Zurückwerfung der Wellen von einer ebenen Wand.

§ 350. Wenn Wellen irgend welcher Art, seien es Schallwellen oder Wasserwellen, die Grenzfläche eines Stoffes treffen, der dichter ist als derjenige, in dem sie sich bis dahin bewegt haben, so kommen sie von der Grenzfläche zurück, weil sich die an der Grenzfläche ankommende Verdichtung ausgleichen muß, was aber nur in der Weise geschehen kann, daß die schwingenden Luft- und Wasserteilchen von der Grenzfläche zurückkehren. Jeder Teil der Welle kehrt natürlich um, wenn er an die Wand kommt, und da die Fortpflanzungsrichtung senkrecht auf der Wellenfläche steht, so ergibt sich hieraus die Richtung, in der die zurückkehrende Welle die Wand verläßt.

Digitized by Google

Es sei M (Fig. 326, a. v. S.) der Punkt, von welchem die Wellen a, b, c, d ausgehen, und RS sei eine senkrechte Wand. Die Welle d, welche sonst bei der punktierten Linie d angekommen sein würde, kommt von der Wand zurück und befindet sich auf der ausgezogenen Linie d. Ebenso ist die Welle e nach e' zurückgekommen. Diese von der Wand zurückkommenden Wellen sind symmetrisch mit den Wellen, die sich beim weiteren Fortschreiten der Wellenbewegung gebildet haben würden. Sie bestehen also aus Kreisen mit dem Mittelpunkt m, der symmetrisch mit M, d. h. in der Verlängerung der Senkrechten Mo ebenso weit hinter der Wand liegt, als M vor derselben. Die zurückgeworfenen Wellen kommen also von der Wand so zurück, als ob sie von m kämen. Die Linie mpn bildet also mit RS denselben Winkel wie Mp.

Fig. 327.



Reflexion des Schalles am Hohlspiegel.

Es ist also ebenso wie bei der Spiegelung (§ 85) der **Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel.**

Daher wird der Schall von verschiedenartig geformten Wänden in derselben Weise zurückgeworfen wie das Licht von entsprechend geformten Spiegeln. Ein Hohlspiegel M (Fig. 327) kann z. B. das von einer Uhr W ausgehende Geräusch in der aus der Figur ersichtlichen Weise in einen Hörtrichter f zurückwerfen.

§ 351. Im Freien finden sich oft Wände, Mauern, Felsen, Waldränder, die die Schallwellen zurückwerfen. Man hört dann je nach der Beschaffenheit der Wände ein mehr oder weniger deutliches Echo. Welche Zeit von der Hervorbringung des Schalles bis zur Wahrnehmung des Echos verfließt, hängt natürlich von der Entfernung der reflektierenden Wand ab. Wenn die Entfernung kurz ist, so muß auch der Schall kurz sein, wenn das Echo getrennt gehört werden und nicht der letzte Teil des Schalles mit dem ersten Teil des Echos zusammenfallen soll. Sogar die Wolken können ein Echo erzeugen, das ohne Zweifel mitwirkt, das „Rollen" des Donners zu erzeugen.

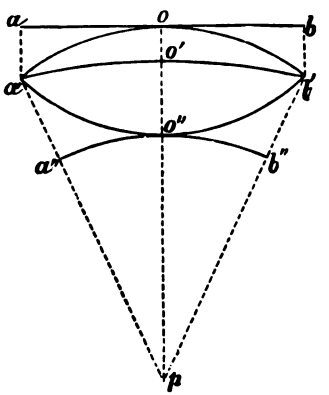
Digitized by Google

indem das Echo des Knalles von den Wolken, je nach der Entfernung derselben, in verschiedenen Augenblicken eintrifft.

Die Erscheinung, daß man in manchen Lokalen mit gekrümmten Wänden an einer gewissen Stelle ein Geräusch deutlich hört, welches an einer anderen Stelle hervorgebracht wird, beruht ebenfalls auf der Reflexion des Schalles. Die Wände können nämlich wie ein Hohlspiegel auf das Licht wirken, so daß die Schallwellen, welche größere Wandflächen treffen, in einen Punkt zusammenlaufen und sich hier verstärken.

In großen Lokalen, Kirchen oder Sälen, wo die Wände, die Decke, Gewölbe und Pfeiler in den verschiedensten Richtungen glatte Flächen darbieten, wirkt jede Fläche in ihrer Weise, und ein scharfer Ton kommt von den verschiedenen Stellen, an denen er zurückgeworfen wird, nicht in demselben Augenblick ins Ohr, und dieses empfindet daher längere Zeit einen dröhnenden Schall. Eine zusammenhängende Rede wird infolgedessen unverständlich, weil immer Teile verschiedener Worte gleichzeitig in das Ohr dringen. Solche Räume haben wegen des Widerhalls eine schlechte „Akustik" für rednerische Vorträge. Bei feierlicher Musik macht sich jedoch die Nachwirkung der Töne nicht in störender Weise bemerkbar.

Fig. 328.



Brechung der Schallwellen beim Durchgang durch Kohlensäure.

§ 352. Wenn eine Schallwelle aus einem Stoff in einen anderen übergeht, so ändert sie ihre Form. Es sei $a'ob'o''$ (Fig. 328) ein mit Kohlensäure gefüllter Kollodiumballon von linsenförmiger Gestalt. Wenn dieser Ballon von einer Schallwelle ab getroffen wird, so schreitet die Mitte der Welle nur von o bis o' fort, während die Ränder von a bis a' und von b bis b' fortschreiten, weil sich die Welle in der Kohlensäure langsamer fortpflanzt als in der atmosphärischen Luft (§ 346). Während dann die Welle in der Kohlensäure weiter von o' bis o'' fortschreitet, schreitet sie in der Luft von a' bis a'' und von b' bis b'' fort. Die geradlinige Welle ab ist also in die gekrümmte Welle $a''o''b''$ verwandelt, die beim weiteren Fortschreiten schließlich im Punkt p zusammenläuft. Hier ist daher die Wirkung der Welle am stärksten.

Die Zurückwerfung des Schalles und die Brechung des Schalles erfolgt, wie man sieht, nach denselben Gesetzen wie die Reflexion und die Brechung des Lichtes (vergl. §§ 75, 85, 94).

§ 353. Da die Wellen, sowohl die Erhöhungswellen auf dem Wasser als auch die Verdichtungswellen in der Luft, dadurch entstehen, daß ein gewisser Druck oder eine gewisse Bewegung von einem Teilchen des Wassers oder der Luft auf die benachbarten Teilchen übertragen wird, so ist es auch leicht einzusehen, was stattfinden muß, wenn ein Teilchen von mehreren

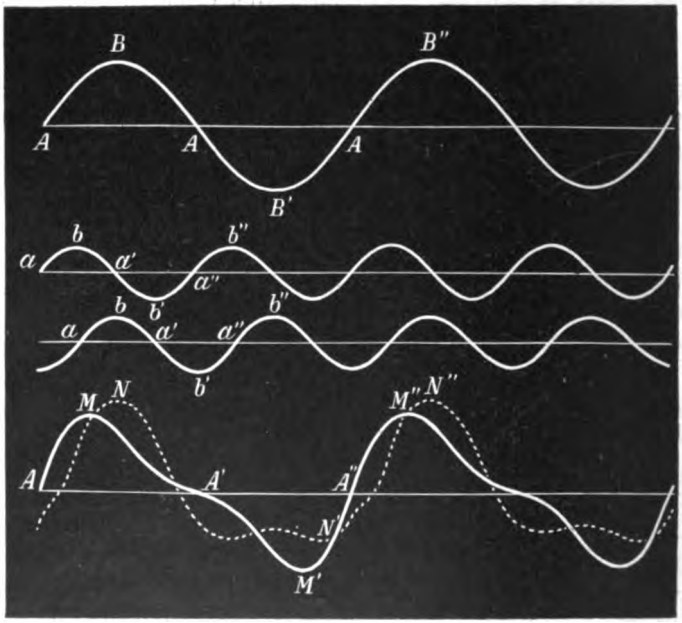
Digitized by Google

Wellenbewegungen gleichzeitig einen Druck erleidet oder in Bewegung gesetzt wird.

Stevin hatte nämlich gezeigt (§ 175), wie sich zwei Kräfte (Drucke), die auf dasselbe Teilchen wirken, zusammensetzen, und Galilei (§ 147) hatte gezeigt, welche Bewegung ein Teilchen macht, welches gleichzeitig der Einwirkung zweier verschiedener Bewegungen unterworfen ist. Man kann hieraus einfach den Schluß ziehen, daß ein Teilchen, auf welches gleichzeitig zwei oder mehr Wellensysteme wirken, in einem bestimmten Augenblick demjenigen Druck ausgesetzt ist und diejenige Bewegung macht, welche sich aus den Drucken und den Bewegungen der einzelnen Wellensysteme als Resultante ergeben.

Ein solches Zusammenwirken verschiedener Wellensysteme kann man an der Küste beobachten, wenn der Wind auf dem Wasser kleine Wellen erzeugt

Fig. 329.



Zusammensetzung von Wellen.

hat und wenn dann ein Dampfer aus größerer Entfernung einige größere Wellen nach der Küste sendet. Man sieht, wie die kleinen Wellen auf die Berge der großen emporsteigen und in die Täler hinabsinken. Ebenso kann man, wenn gleichzeitig mehrere Töne von verschiedenen Richtungen her in das Ohr eintreten, nach Belieben die Aufmerksamkeit auf den einen oder anderen richten und jeden derselben mit seinen Eigentümlichkeiten erkennen, während in Wirklichkeit ein Komplex (ein zusammengesetzter Klang) in das

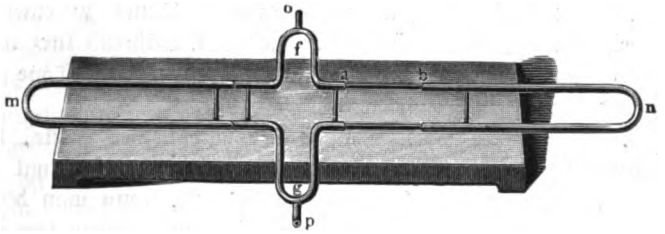
Digitized by Google

Ohr kommt. Dies beweist, daß in dem Komplex jede Einzelwirkung enthalten ist und daß das Ohr die Fähigkeit besitzt, diese aus dem Komplex auszuscheiden.

Eine solche zusammengesetzte Welle kann eine sehr unregelmäßige Form haben. Selbst eine Reihe von regelmäßigen Wellen $A\,B\,B'B''$ (Fig. 329) und eine Reihe von Wellen $a\,b\,b'b''$ von derselben Form, aber der halben Länge, erzeugen schon eine Welle $A\,M\,M'\,M''$ von ziemlich unregelmäßiger Form. Wird die zweite Wellenreihe ein wenig verschoben, so wird die Form der resultierenden Welle $N\,N'\,N''$ noch verwickelter. Doch ist sie immer noch verhältnismäßig einfach im Vergleich mit Wellen, die durch das Zusammenwirken von mehreren Wellenreihen entstehen, bei denen die Form und das Verhältnis der Längen weniger einfach ist.

§ 354. Eine Folge des Zusammenwirkens mehrerer Wellen ist die sogenannte Interferenz. Sie besteht darin, daß zwei Systeme von Wellen

Fig. 330.



Interferenz der Schallwellen.

gleicher Länge an einigen Stellen zusammenwirken, so daß sich ihre Wirkung verstärkt, während sie sich an anderen Stellen gegenseitig aufheben, weil ein Berg des einen Systems mit einem Tal des anderen Systems zusammentrifft. Sendet man in das Rohr o des in Fig. 330 abgebildeten Apparates einen Ton, so verteilen sich die Wellen auf die beiden Zweige des Rohres und treten gemeinsam bei p aus. Wenn nun die beiden Wege gleich lang sind, so treffen die Wellen bei p in gleichem Zustande zusammen und man hört an der Öffnung p einen kräftigen Ton. Wenn man nun den einen Zweig des Rohres durch Ausziehen des beweglichen Teiles verlängert, so wird der Ton bei p schwächer, und er verschwindet vollständig, wenn der eine Weg, den die Schallwellen in dem Rohr durchlaufen, um eine halbe Wellenlänge länger ist als der andere. Wird das Rohr noch mehr verlängert, so wird der Ton wieder stärker, und wenn der eine Zweig des Rohres um eine ganze Wellenlänge länger ist als der andere, so hat der Ton wieder seine ursprüngliche Stärke.

Ein anderes Beispiel von Interferenz kann man ohne weitere Hilfsmittel an der Stimmgabel beobachten[1]). Wenn man eine Stimmgabel

[1]) Die Stimmgabel wurde um 1711 vom englischen Militärhornisten John Shore erfunden.

Digitized by Google

anschlägt, so schwingt sie in der Weise, daß sich die beiden Zinken abwechselnd einander nähern und voneinander entfernen. Wenn sie sich einander nähern, gehen von den Zinken ein Paar Verdünnungswellen, vom Zwischenraum der Zinken dagegen ein Paar Verdichtungswellen aus. Das entgegengesetzte findet statt, wenn sich die beiden Zinken voneinander entfernen. Da, wo die Verdünnungswellen und die Verdichtungswellen zusammenstoßen, werden die Verdichtungen der einen durch die Verdünnungen der anderen aufgehoben. Hiervon kann man sich dadurch überzeugen, daß man die Stimmgabel vor das Ohr hält und den Stiel derselben zwischen den Fingern dreht. Der Ton verschwindet dann jedesmal, wenn dem Ohre diejenige Richtung zugewendet ist, in welcher die beiden Wellensysteme ineinander eindringen.

Man spricht in der Regel nur von der Interferenz eines Tones mit sich selbst oder mit seinem Echo oder mit einem anderen Ton, der genau dieselbe Schwingungszahl hat. Man kann jedoch auch die in § 338 beschriebenen Stöße als eine Interferenzerscheinung bezeichnen, indem die Verdichtungswelle des einen und die Verdünnungswelle des anderen Tones zu einer gewissen Zeit gleichzeitig eintreffen und sich daher aufheben, während kurz nachher die Verdichtungswellen und ebenso die Verdünnungswellen beider Töne gleichzeitig eintreffen und sich daher verstärken.

§ 355. Wenn man einen Ton in der Nähe einer Saite, die genau auf denselben Ton abgestimmt ist, kräftig erklingen läßt, so fängt die Saite selbst an zu tönen, was man leicht beobachten kann, wenn man den anderen Ton aufhören läßt. Diese Erscheinung war jedenfalls schon lange bekannt, als sie in der Mitte des 17. Jahrhunderts von zwei Schülern von Wallis (§ 178), William Noble und Thomas Pigot, untersucht wurde. Wallis hat 1677 über diese Untersuchung in den Schriften der Royal Society berichtet.

Man nannte derartige Töne sympathische Töne. Die Bezeichnung erinnert an Beobachtungen, die man an Uhren gemacht hatte. Huygens hatte beobachtet, daß zwei Uhren, die im Laufe eines Tages fünf Sekunden voneinander abwichen, gleich schnell gingen, als sie in dasselbe Zimmer gebracht wurden, obwohl sie hier 15 Fuß voneinander entfernt waren. Huygens erklärte diese „Sympathie" durch die Bewegung der Luft, allein 1739 beobachtete der Engländer Ellicot etwas ähnliches an zwei Uhren, die nur zwei Fuß voneinander entfernt waren, die sich aber in zwei dicht verschlossenen Kästen befanden. Diese Uhren wichen in ihrem Gange täglich 90 Sekunden voneinander ab, aber die Sympathie war hier so stark, daß jede der beiden Uhren, wenn man sie anhielt, nach $^1/_4$ bis $^1/_2$ Stunde von selbst wieder in Gang kam. Ellicot zeigte, daß dies durch ganz kleine und an und für sich unmerkliche Bewegungen bewirkt wird, die sich von der gehenden Uhr auf die stillstehende übertragen. Wenn er nämlich die beiden Kästen durch einen Holzstab in Verbindung setzte, so kam die stillstehende Uhr viel schneller in Bewegung.

Diese Erscheinung zeigt, daß ein schwingender Körper — ein Pendel — in große Schwingungen kommen kann, wenn er im richtigen Takt eine Menge

Digitized by Google

kleiner Stöße bekommt. Die Bewegung, welche das Pendel einmal hat, behält es bei, und diese Bewegung wird durch die rechtzeitig eintretenden weiteren Stöße immer mehr verstärkt.

Dasselbe gilt von einer Saite. Die Wellen, welche sie treffen, haben einzeln allerdings nur eine sehr geringe Wirkung, allein die Wirkungen summieren sich, und da die Wellen in kurzer Zeit zu Hunderten ankommen, so kann die Saite alsbald in ziemlich starke Schwingungen kommen, vorausgesetzt, daß die Wellen im richtigen Augenblick kommen, d. h. daß der erregende Ton mit dem Ton der Saite genau übereinstimmt.

§ 356. Der Versuch von Noble und Pigot führte zur Erklärung einer anderen Erscheinung, die ebenfalls früher nicht ganz unbekannt gewesen war.

Die Äolsharfe (Fig. 331) soll bereits im Altertum bekannt gewesen, nach einer anderen Annahme dagegen von dem deutschen Mathematiker Athanasius Kircher (1601 bis 1680) erfunden worden sein. Auch der schottische Arzt Oswald wird als Erfinder derselben genannt. Vielleicht hat jeder von ihnen die Erfindung selbständig gemacht oder der Vorrichtung eine besonders zweckmäßige Form gegeben. Sie besteht aus einem Rahmen, in den mehrere Saiten eingespannt sind und der an einer Stelle angebracht wird, wo der Wind oder der Luftzug die Saiten in Bewegung setzen kann. Selbst eine einzige Saite kann eine Menge verschiedener Töne hervorbringen. — Etwas ähnliches, wenn auch mit geringerer Mannigfaltigkeit der Töne, kann man heutzutage beobachten, wenn die Drähte einer Telegraphenleitung von einem hinreichend starken Wind getroffen werden.

Fig. 331.

Äolsharfe.

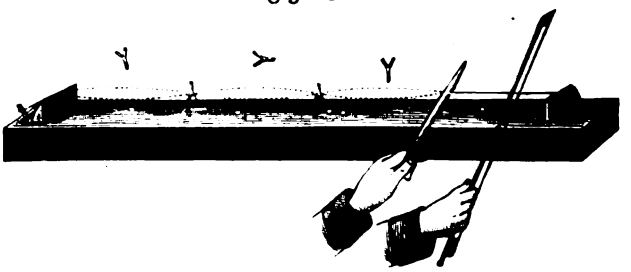
Noble und Pigot fanden nun, daß eine Saite nicht nur durch ihren eigenen Ton, sondern auch durch gewisse andere Töne in Schwingung versetzt werden kann, nämlich durch Töne, die die doppelte, die dreifache, die vierfache u. s. w. Schwingungszahl haben. Die Saite gab dann nicht den tiefen Ton, auf den sie gestimmt war, sondern den höheren Ton, durch den sie in Schwingung versetzt wurde. Durch Aufsetzen von Papierreitern wurde nachgewiesen, daß nicht die Saite in ihrer ganzen Länge in Schwingung kam, sondern daß die Mitte in Ruhe blieb, wenn der erregende Ton die doppelte Schwingungszahl der Saite hatte, daß zwei Punkte der Saite in Ruhe blieben, wenn der erregende Ton die dreifache Schwingungszahl hatte, u. s. w. An denjenigen Punkten der Saite, die in Ruhe blieben, den sogenannten

Digitized by Google

Knoten, blieben die Papierreiter sitzen, während sie an den übrigen Stellen herabflogen.

§ 357. Einige Jahre später machte Sauveur ganz ähnliche Versuche, ohne die früheren zu kennen. Er fand zugleich ein anderes Mittel, die Saite in zwei, drei, vier ... Teilen schwingen zu lassen. Dieses Mittel besteht darin, daß man die Saite in einem Punkt, der die Hälfte, den dritten, vierten u. s. w. Teil der Saite abgrenzt, leise mit dem Finger berührt und die Mitte des abgegrenzten Teiles der Saite mit dem Violinbogen anstreicht. Ein solcher Versuch wird durch Fig. 332 veranschaulicht. Die Saite schwingt in vier Teilen oder mit drei Knoten. Die Reiter auf den Schwingungs-

Fig. 332.



Schwingung einer Saite mit drei Knoten.

knoten bleiben sitzen, während die auf den Schwingungsbäuchen abfliegen. Die Bezeichnungen „Knoten" und „Bäuche" wurden von Sauveur eingeführt. Wenn man eine mit Knoten schwingende Saite genau betrachtet, so unterscheidet man leicht die schwingenden und die ruhenden Teile der Saite, die Bäuche und die Knoten. Die Schwingungen gehen in der Weise vor sich, daß zwei Teile, die durch einen Knoten getrennt sind, immer in entgegengesetzter Richtung schwingen.

Die Töne, welche die doppelte, dreifache, vierfache ... Schwingungszahl haben, heißen in bezug auf den Ton von einfacher Schwingungszahl, den Grundton, Obertöne. Diese Obertöne spielen für das Verständnis der Musik und der Sprache eine sehr wichtige Rolle.

§ 358. Ein Mittel, die Schwingungen einer Platte sichtbar zu machen, wurde von E. F. F. Chladni erfunden. Er war 1756 in Wittenberg geboren und starb 1827 in Breslau. Er studierte Rechtswissenschaft und wurde Doctor juris, allein nach dem Tode seines Vaters wandte er sich den Naturwissenschaften zu und beschäftigte sich namentlich mit Akustik. Er lebte ganz seiner Lieblingsbeschäftigung, ohne ein Amt zu bekleiden. Seinen Unterhalt erwarb er sich durch seine literarische Tätigkeit, sowie durch Vorträge und Vorführung der von ihm erfundenen Apparate, unter diesen auch zweier musikalischer Instrumente, die jedoch nicht in allgemeinen Gebrauch gekommen sind. Bei dem einen derselben, dem Euphon, wurden die Töne durch Bestreichen von Glasstäben mit den befeuchteten Fingern hervorgebracht, bei

Digitized by Google

dem anderen, dem Klavierzilinder, durch Andrücken von Holzstäben an einen rotierenden Glaszilinder. Chladni hat auch einige Schriften über die Meteorsteine veröffentlicht, in denen er hervorhob, daß diese nicht aus der Atmosphäre, sondern aus dem Weltraum stammen, eine Auffassung, die damals neu war und viel bestritten wurde, während heutzutage die Richtigkeit derselben wohl von niemandem bezweifelt wird.

Fig. 333.

Wenn eine elastische Platte, z. B. aus Glas oder Messing, die in einem ihrer Punkte befestigt ist, an einem zweiten Punkte mit dem Finger berührt und dann an einem Punkte des Randes mit einem Violinbogen angestrichen wird, so kommt die Platte in Schwingung, aber so, daß gewisse Linien in Ruhe bleiben. Diese Knotenlinien machte Chladni dadurch sichtbar, daß er trockenen Sand auf die Platten streute. Die Sandkörnchen werden dann beim Anstreichen der Platte von den schwingenden Stellen hinweggeschleudert und sammeln sich auf den Knotenlinien an (Fig. 334).

In Fig. 335 sind einige Klangfiguren abgebildet, die auf einer in der Mitte festgehaltenen quadratischen Platte entstehen, wenn der Punkt *a* mit dem Finger berührt und die Platte am Punkt *b* angestrichen wird. Es lassen sich eine Menge anderer Figuren hervorbringen. Wenn man einen beliebigen Punkt der Platte berührt und einen beliebigen Punkt des Randes mit dem Violinbogen anstreicht, so erhält man fast immer eine Klangfigur. Die Figuren werden um so schöner, je reiner der Ton ist.

Je höher der Ton ist, desto größer ist die Anzahl der einzelnen schwingenden Teile der Platte und desto verwickelter sind daher die Figuren. In Fig. 336 a sind einige einfachere und in Fig. 336 b einige verwickeltere Klangfiguren abgebildet, die sich auf kreisförmigen Scheiben erzeugen lassen. Um die Bildung ringförmiger Figuren zu bewirken, muß die Scheibe nicht in der Mitte, sondern in einem Punkt (*a*) des zu erzeugenden Ringes festgeklemmt

Digitized by Google

sein und am Rande oder besser in einer kreisförmigen Durchbohrung in der Mitte angestrichen werden.

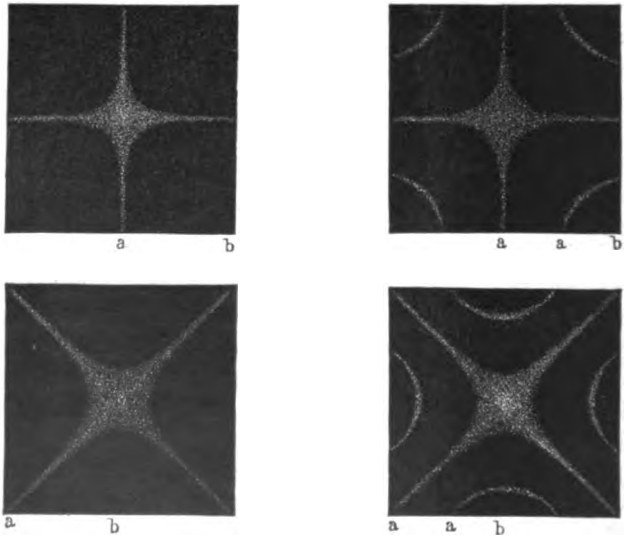
§ 359. Man hat nun gefunden, daß schwingende Saiten und Platten, überhaupt alle tönenden Körper, außer ihrem Grundton auch dann Obertöne hervorbringen, wenn man sie nicht absichtlich (durch Berührung) hervorruft. Allerdings sind diese Obertöne in den meisten Fällen nicht sehr stark. Der Mann, welcher sich um die Erforschung der Obertöne ganz besonders verdient gemacht hat, ist Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (geb. 1821 in Potsdam, gest. 1894 in Charlottenburg).

Fig. 334.

Entstehung der Klangfiguren.

Helmholtz war der Sohn eines Gymnasialprofessors. Er besuchte das Gymnasium seiner Vaterstadt und studierte dann in Berlin Medizin. Im Jahre 1843 wurde er Militärarzt in Potsdam, 1848 Lehrer der Anatomie an der Kunstschule in Berlin und 1849 Professor der Physiologie in Königs-

Fig. 335.



Klangfiguren auf einer quadratischen Platte.

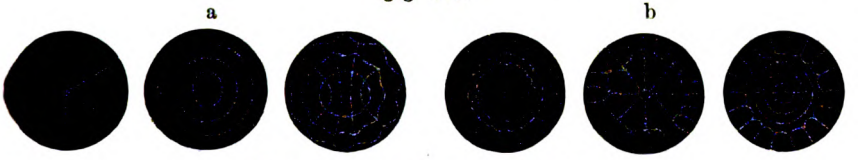
berg, wo er eine Reihe schöner physiologischer Entdeckungen begann. Als Arzt vertrat er den Standpunkt, daß sich die Vorgänge im menschlichen

Digitized by Google

Körper nach denſelben phyſikaliſchen und chemiſchen Geſetzen vollziehen, welche außerhalb des Körpers wirken. Hiermit im Einklang ſteht es, daß Helmholtz die phyſikaliſchen Vorgänge des Hörens und des Sehens eingehender als irgend ein anderer unterſucht hat.

Er erkannte, daß man den Hintergrund eines fremden Auges deshalb nicht ſehen kann, weil der Hintergrund des Auges kein anderes Licht zurück-

Fig. 336.



Klangfiguren auf runden Platten.

wirft, als dasjenige, welches von dem Gegenſtand kommt, der ſich auf dem Hintergrund abbildet. Da nun dieſer Gegenſtand das Auge des Beobachters iſt und dieſes kein Licht ausſendet, ſo erſcheint der Hintergrund dunkel. Um ihn zu beleuchten, ſtellte Helmholtz eine Glasplatte ſchief zwiſchen die beiden Augen, das beobachtende und das beobachtete, ſo daß durch das Glas Licht von einer ſeitlich aufgeſtellten Lampe in das zu beobachtende Auge reflektiert wurde. Das Licht kommt vom Hintergrunde des Auges zurück und tritt durch die Glasplatte hindurch in das Auge des Beobachters ein. Die aus dem beobachteten Auge zurückkommenden Strahlen ſind jedoch ſo ſtark konvergierend, daß ſie der Beobachter durch eine Hohllinſe zerſtreuen muß, damit er ein deutliches Bild vom Hintergrunde des beobachteten Auges bekommt (vergl. § 111). Helmholtz erfand ſo den Augenſpiegel. Später hat man noch andere Formen desſelben konſtruiert. Er hat eine große Bedeutung für die Augenheilkunde gewonnen und Helmholtz ſelbſt hat mit Hilfe desſelben verſchiedene andere wichtige Entdeckungen gemacht.

Fig. 337.

Helmholtz.

Helmholtz wurde 1855 Profeſſor in Bonn und 1858 in Heidelberg, und zwar ebenfalls für das Fach der Phyſiologie. Im Jahre 1871 wurde er als Direktor des phyſikaliſchen Inſtituts der Univerſität nach Berlin berufen

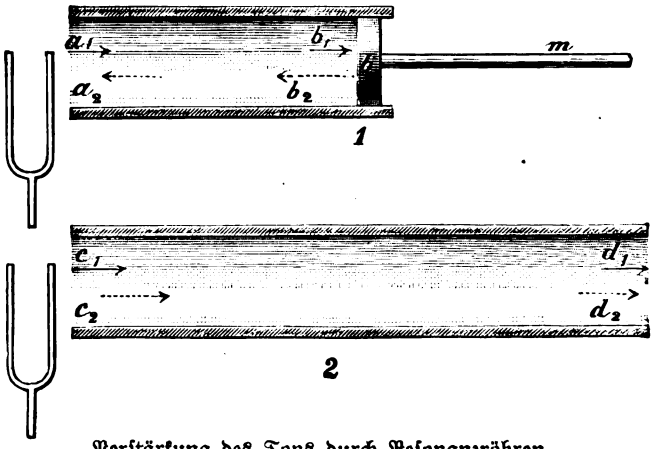
Digitized by Google

und 1888 wurde er Direktor der neu gegründeten physikalisch-technischen Reichsanstalt in Charlottenburg. Diese Stellung bekleidete er bis zu seinem Tode.

§ 360. Ganz besonders verdient gemacht hat sich Helmholtz um die Physik des Ohres. Bei seinen Untersuchungen bediente er sich eines von ihm erfundenen sehr einfachen Apparates, des sogenannten Resonators. Um die Wirkung desselben zu verstehen, müssen wir zunächst die schwingende Bewegung der Luft in Röhren betrachten.

Es war seit langer Zeit bekannt, daß Röhren von bestimmter Länge Töne von einer gewissen Höhe verstärken können, und zwar verschiedene Töne,

Fig. 338.



Verstärkung des Tons durch Resonanzröhren.

je nachdem die Röhren an beiden Enden offen oder an dem einen Ende geschlossen sind.

Hält man eine Stimmgabel mit dem einen Zinken vor die Mündung einer Röhre (Fig. 338, 1), in welcher ein Boden oder ein Kolben an einer solchen Stelle angebracht ist, daß die Länge der Röhre gleich $^1/_4$ Wellenlänge des Stimmgabeltons ist (vergl. § 343), so sendet die Gabel jedesmal, wenn sich der Zinken nach der Mündung hinbewegt, eine Verdichtungswelle a_1 in die Röhre. Dieselbe wird von dem Boden b zurückgeworfen und kommt in dem Augenblick wieder an der Mündung (a_2) an, wenn der Zinken der Stimmgabel sich von der Mündung entfernt und also in dieser eine Verdünnungswelle erzeugt. Die Bewegung a_2 verstärkt also die Wirkung der Gabel, welche in diesem Augenblick eine Verdünnung (ein Wellental) erzeugt. Diese pflanzt sich nun ebenfalls bis auf den Boden fort, kommt nach der Mündung zurück und saugt Luft in die Mündung hinein (a_1), während sich der Zinken der Stimmgabel nach der Mündung hinbewegt und also eine Bewegung in derselben Richtung (a_1) bewirkt. Die von b zurückgeworfenen Bewegungen stimmen also an der Mündung der Röhre mit denjenigen überein, welche die Gabel hervorbringt und der Ton wird infolgedessen verstärkt.

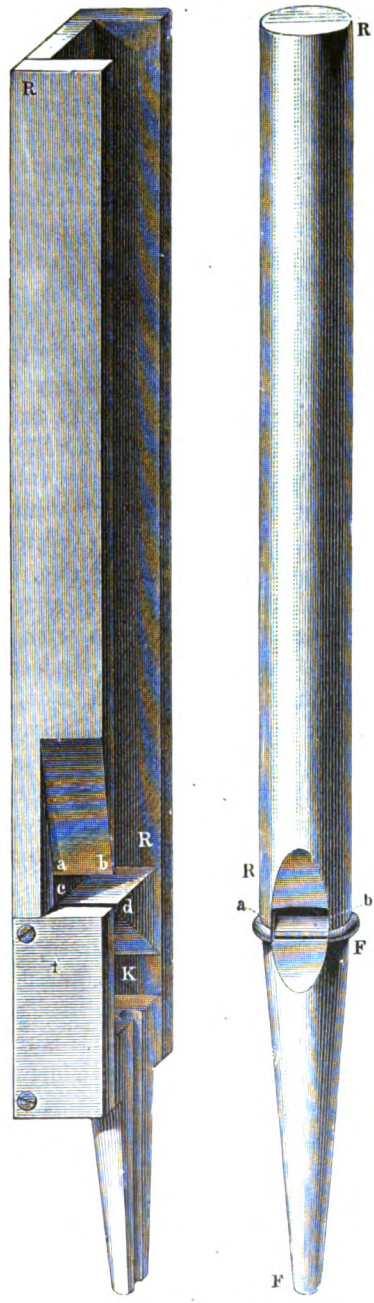
Digitized by Google

Dasselbe ist auch der Fall, wenn die Länge der Röhre gleich $^3/_4$ Wellenlängen des Stimmgabeltons ist. In diesem Falle kommt nämlich die Welle nicht nach $^1/_2$ Schwingungszeit, sondern nach $1^1/_2$ Schwingungszeiten an die Mündung zurück und befindet sich also in demselben Bewegungszustande. Überhaupt wird ein Ton durch eine geschlossene Röhre verstärkt, wenn die Wellenlänge des Tones in der Röhre $^1/_4$=, $^3/_4$=, $^5/_4$= $^7/_4$ mal u. s. w. enthalten ist.

Hält man eine schwingende Stimmgabel vor die Mündung einer an beiden Enden offenen Röhre, deren Länge gleich $^1/_2$ Wellenlänge des Tones ist, so wird der Ton ebenfalls verstärkt. Wenn nämlich eine Verdichtungswelle c_1 am anderen Ende der Röhre d_1 ankommt, so kann sich die verdichtete Luft nach allen Richtungen hin ausdehnen. Infolgedessen entsteht am Ende der Röhre eine Verdünnung. Diese läuft durch die Röhre nach dem anderen Ende zurück und ruft hier eine Bewegung (c_2) hervor, die mit derjenigen übereinstimmt, die in demselben Augenblick von der Gabel hervorgerufen wird. Dieselbe verstärkende Wirkung übt eine offene Röhre aus, wenn die Wellenlänge des Tones 1=, $1^1/_2$=, 2=, $2^1/_2$ mal u. s. w. in der Länge der Röhre enthalten ist. Die offene Röhre wirkt also verstärkend, wenn ihre Länge eine gerade Anzahl von Viertelwellenlängen enthält, die geschlossene Röhre dagegen, wenn sie eine ungerade Anzahl von Viertelwellenlängen enthält.

§ 361. Hiermit erklärt sich auch die Wirkung der gewöhnlichen Pfeife oder Lippenpfeife, Fig. 339. Der Luftstrom, der durch eine kleine Öffnung

Fig. 339.



Lippenpfeife.

Digitized by Google

eingeblasen wird, trifft auf eine scharfe Kante, so daß er sich zur Seite drehen muß, entweder nach innen in die Pfeifenröhre oder nach außen in die freie Luft. Wenn nun der Gang des Luftstrahles nicht durch die Länge der Röhre bestimmt würde, so würde sie unregelmäßig gegen die scharfe Kante strömen und einen zischenden Ton hervorbringen, ebenso als wenn man gegen eine Messerklinge bläst. Wenn aber der Strahl in einem bestimmten Augenblick in die Röhre eintritt, so wird, wenn die Röhre geschlossen ist, eine Verdichtung zurückkommen, sobald der Schall die Röhre hin und zurück durchlaufen hat. Hierdurch wird aber eine nach außen gerichtete Bewegung erzeugt, d. h. der Strahl tritt in die äußere Luft über. Dies hat die Bildung einer Verdünnung zur Folge, die ebenfalls bis zum Ende der Röhre fortschreitet, zurückkommt und den Strahl nach innen saugt. So wird der Strahl abwechselnd nach innen und nach außen getrieben und es entsteht ein Ton, dessen Schwingungszeit gleich derjenigen Zeit ist, welche der Schall braucht, um die Länge der Röhre viermal (zweimal hin und zweimal her) zu durchlaufen. — Eine Pfeife kann auch höhere Töne geben, die den in § 360 erwähnten Tönen entsprechen. Diese Töne entstehen, wenn die Röhre nicht zu weit ist und wenn sie kräftig angeblasen wird.

Auch wenn die Röhre offen ist, kommt der Luftstrahl in regelmäßige Schwingung. Eine Verdichtung, welche entsteht, wenn der Strahl nach innen gerichtet ist, pflanzt sich bis zum offenen Ende der Röhre fort, findet hier Platz zur Ausdehnung und erzeugt eine Verdünnung, die dann Luft aus der Röhre heraussaugt. Dies Saugen pflanzt sich bis zum Strahl fort, der bis dahin nach außen gerichtet war, jetzt aber nach innen gezogen wird. So entsteht ein Ton, dessen Schwingungszeit gleich derjenigen Zeit ist, welche der Schall braucht, um die Länge der Röhre zweimal (einmal hin und zurück) zu durchlaufen. Dieser Ton macht also doppelt so viel Schwingungen wie derjenige, den dieselbe Pfeife erzeugt, wenn sie am Ende geschlossen ist. — Auch hier lassen sich durch stärkeres Anblasen der Pfeife höhere Töne hervorbringen.

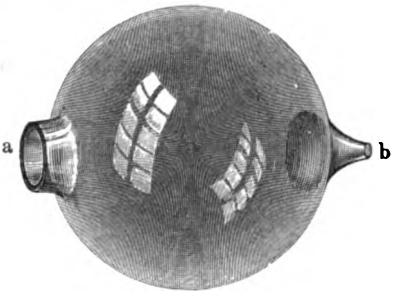
§. 362. Helmholtz hat nun eingehend untersucht, welche höheren Töne durch Röhren von verschiedener Form verstärkt werden, und es ist ihm gelungen, eine Form aufzufinden, durch die nur ein einziger bestimmter Ton verstärkt wird. Von diesen „Resonatoren" machte Helmholtz einen ausgedehnten Gebrauch, um die Anwesenheit oder Abwesenheit eines bestimmten Tones festzustellen. Er verfolgte nämlich den von der Erfahrung angedeuteten Weg. Eine Orgelpfeife, welche im Verhältnis zu ihrer Länge sehr weit ist, gibt nämlich nur schwierig andere Töne als den Grundton. Derartige Pfeifen wirken nur verstärkend auf denjenigen Ton, dessen Wellenlänge gleich dem Vierfachen der Röhrenlänge ist.

Helmholtz fand, daß die Eigenschaft, nur auf einen einzigen Ton verstärkend zu wirken, in noch höherem Grade als Pfeifen der gewöhnlichen Form eine Kugel besitzt, deren Durchmesser gleich dem vierten Teil der Wellenlänge des betreffenden Tones ist. Der Mündung gegenüber war die Kugel in eine offene

Digitized by Google

Spitze ausgezogen, die mit halbgeschmolzenem Schellack umgeben und dann in den Gehörgang hineingedrückt wurde, so daß der Schall nur durch die Kugel in das Ohr eintreten konnte. In das andere Ohr wurde ein Resonator von gleicher Größe eingesetzt, oder das Ohr wurde vollständig mit erweichtem Schellack verschlossen. Man ist sozusagen taub für alle Töne mit Ausnahme desjenigen, welcher durch den Resonator verstärkt wird. Man hört dann aus den kompliziertesten Geräuschen oder aus einem Musikstück immer nur diesen einen Ton. Mit Hilfe dieser Resonatoren hat Helmholtz eine Menge wichtiger Untersuchungen über verschiedene Schallquellen, namentlich auch die menschliche Stimme, ausgeführt.

Fig. 340.



Helmholtzscher Resonator.

§ 363. Stimmgabeln und geschlossene (gedeckte) Orgelpfeifen, die ersteren namentlich vor einer Resonanzröhre (§ 360), geben einen sehr einfachen, nicht sehr kräftigen, aber angenehmen und dabei etwas dumpfen Ton.

Saiten dagegen bringen außer dem Grundton leicht eine ganze Anzahl von Obertönen hervor, wodurch der Ton einen helleren Klang erhält. Welche Obertöne entstehen, hängt sehr wesentlich davon ab, an welcher Stelle die Saite angeschlagen wird. Geschieht dies in der Mitte, so fallen die „geraden" Obertöne, d. h. die von der doppelten, vierfachen, sechsfachen u. s. w. Schwingungszahl des Grundtons aus. Dadurch erhält der Ton einen hohlen Klang. Durch das Vorhandensein ziemlich hoher „ungerader" Obertöne dagegen nimmt er einen schnarrenden Klang an. In der Musik legt man Wert darauf, daß die ersten Obertöne (von der doppelten bis sechsfachen Schwingungszahl des Grundtones) reichlich vorhanden sind. Dagegen vermeidet man gern das Auftreten des Obertones von der siebenfachen Schwingungszahl des Grundtones. Die Saiten eines Klaviers werden daher in der Regel in einem Punkt angeschlagen, der vom Ende um $^1/_7$ der Länge entfernt ist.

Der Klang einer Saite, der durch die Menge der Obertöne bestimmt wird, hängt ferner von der Art und Weise ab, wie die Saite in Schwingung versetzt wird, ob durch Zupfen mit dem weichen Finger oder durch Anschlagen mit einem Metallstift oder einem Hammer. Auch die Beschaffenheit des Hammers und die Dauer der Berührungszeit sind Umstände, auf die der Instrumentenmacher und der Musiker Rücksicht zu nehmen hat.

Die Anwesenheit sehr hoher Obertöne gibt dem Ton einen rauhen und klirrenden Klang. Trotzdem erzielt man mit ihnen in großen Orchestern (Triangel, Becken) an geeigneter Stelle gute Wirkungen. Auch die Trompete, die Harmonika und andere mehr oder weniger aus Metall bestehende Instrumente erzeugen sehr hohe Obertöne.

§ 364. Welche Töne zusammen oder nacheinander angenehm klingen,

Digitized by Google

hat die Erfahrung gelehrt, längst ehe man etwas von der Schwingungszahl der Töne wußte (§ 335). Als diese bekannt wurden, zeigte es sich, daß der Wohlklang zweier Töne darauf beruht, daß die Schwingungszahlen in einem einfachen Verhältnis zueinander stehen. Je einfacher diese Verhältnisse sind, desto vollkommener ist der Wohlklang. Abgesehen vom „Einklang" sind die angenehm klingenden „Intervalle" nach dem Grade des Wohlklanges geordnet die folgenden. Die Zahlen geben das Verhältnis der Schwingungszahlen des Grundtones und des genannten Tones an:

Oktav	1 : 2
Duodecime	1 : 3
Quint	2 : 3
Quart	3 : 4
Große Sext	3 : 5
Große Terz	4 : 5
Kleine Terz	5 : 6.

Jedes Paar von diesen Tönen hat einen oder mehrere gemeinsame Obertöne. Diese sind um so höher, je kleiner das Intervall der beiden Töne ist. Bezeichnet man die Schwingungszahl des Grundtones mit T_1, die Schwingungszahlen seiner Obertöne mit T_2, T_3 . . ., ferner die Schwingungszahlen des anderen Tones des Intervalls und seiner Obertöne bezw. mit t_1, t_2, t_3 . . ., so ergibt sich für den Grundton T_1 mit 300 Schwingungen die folgende Tabelle:

	300	600	900	1200	1500	1800
Grundton (300)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
Oktav (600)	—	t_1	—	—	—	—
Duodecime (900)	—	—	t_1	—	—	—
Quint (450)	—	—	t_2	—	—	—
Quart (400)	—	—	—	t_3	—	—
Große Sext (500)	—	—	—	—	t_3	—
Große Terz (375)	—	—	—	—	t_4	—
Kleine Terz (360)	—	—	—	—	—	t_5

Je wohlklingender ein Intervall ist, desto eher trifft man, wie aus dieser Übersicht hervorgeht, einen Ton oder Oberton, der mit einem Oberton des Grundtones übereinstimmt.

Wenn nun die genannten Töne von Saiten oder ähnlichen Tonquellen hervorgebracht werden, welche Obertöne bis t_6 geben, so ist in den genannten wohlklingenden Intervallen immer ein Paar von den ersten oder den folgenden Obertönen vorhanden, die miteinander übeinstimmen. Hierdurch wird aber die Harmonie der beiden Töne erhöht und der Übergang vom einen

Digitized by Google

zum anderen erleichtert, weil immer ein Paar von Tönen vorhanden ist, die vollkommen übereinstimmen.

§ 365. Auf das Vorhandensein gemeinsamer Obertöne bei zwei Tönen, die einen Wohlklang bilden, begründete man im 18. Jahrhundert die Harmonielehre. Ein Hauptvertreter dieser Theorie war der berühmte französische Musiker und Komponist J. Ph. Rameau (1683 bis 1764). Diese Erklärung des Wohlklanges setzt aber voraus, daß die beiden Töne von allen ihren nächsten Obertönen begleitet sind. Sie ist daher unzureichend für Töne, die nur wenig oder gar keine Obertöne besitzen. Tonquellen, welche nur derartige Töne hervorbringen, eignen sich allerdings weniger für musikalische Zwecke, weil die Obertöne als Bindemittel zwischen zwei aufeinander folgenden Tönen fehlen. Es können aber auch geradezu Disharmonien auftreten, sowohl beim Zusammenklingen, als auch beim Aufeinanderfolgen zweier Töne.

Helmholtz gab eine andere Erklärung. Je mehr sich zwei Töne voneinander entfernen, desto schneller folgen die Stöße oder Schwebungen aufeinander (§ 338). Diese geben aber den Tönen einen unangenehmen Klang, der am stärksten ist, wenn die Anzahl der Stöße für Töne von mittlerer Höhe ungefähr 33 in der Sekunde ist. Für tiefere Töne ist die Zahl etwas kleiner, für höhere etwas größer. Wird die Anzahl der Stöße größer, so nimmt das Unangenehme des Klanges wieder ab, und bei 132 Stößen ist es bei mittlerer Tonhöhe wieder vollständig verschwunden. So hatte Helmholtz für die Dissonanz zweier Töne eine Art Maßstab gefunden, und diesen legte er an verschiedene wohlklingende Intervalle an, die man früher als mehr oder weniger dissonant bezeichnet hatte.

Helmholtz fand nämlich mit Hilfe seiner Resonatoren, daß nicht nur zwei Grundtöne Stöße geben können, wenn sie nicht genau stimmen, sondern auch ein Paar Obertöne, die er jetzt permittelst der Resonatoren von den Grundtönen und den übrigen Obertönen getrennt hören konnte. Diese Stöße folgen natürlich um so schneller aufeinander, je weiter die betreffenden Obertöne auseinanderliegen. Ferner kann der Tartinische Ton, den die beiden Töne erzeugen, mit einem der Töne Stöße bilden. Sind nun unter den beiden Tönen selbst, ihren Obertönen und Tartinischen Tönen zwei, die in der Sekunde 33 Stöße geben, so wird der Klang so unangenehm, wie er überhaupt werden kann. Auch eine geringere und eine größere Anzahl von Stößen, wenn sie 132 nicht übersteigt, erzeugt Dissonanz. Aus der Zusammenstellung der wohlklingenden Intervalle (S. 331) wird man ersehen, daß von Oktav, Duodecime und ihren Obertönen keiner dem Grundton oder dessen Obertönen näher als 300 liegt. Die Tartinischen Töne sind 300 und 600. Durch die Quint, ihre Obertöne und Tartinischen Töne kommt auch kein Intervall hinzu, welches kleiner als 150 ist. Also geben auch diese Intervalle keine Veranlassung zu Dissonanzen. Sie werden daher seit langer Zeit als „absolut konsonant" bezeichnet. Die Quart, ihre Obertöne und Tartinischen Töne (100) kommen dem Grundton und seinen Obertönen nirgends näher als 100 Stöße, z. B. durch 300 und 400 oder durch 900 (T_2) und

Digitized by Google

800 (t_2). Aber dies ist kaum wahrzunehmen, so daß die Quart noch als „vollkommen konsonant" bezeichnet wird. Etwas ungünstiger liegen die Verhältnisse bei tiefen Tönen. Ist z. B. die Schwingungszahl eines Tones 150, folglich die Schwingungszahl seiner Quart 200, so entstehen in der Sekunde 50 Stöße. Ja hier fängt sogar die Quint an, etwas dissonant zu sein. Man bezeichnet sie daher oft nicht als „absolut", sondern nur als „vollkommen" konsonant.

Auch die große Sext gibt Veranlassung zur Entstehung von Tönen von 100 Schwingungen. Bei einer Tonhöhe von 500 bis 600 Schwingungen ist aber ein derartiger Ton ziemlich dissonant. Daher wird die große Sext, ebenso die große Terz, die 75 Stöße gibt, nur als „mittelkonsonant" bezeichnet.

Die kleine Terz gibt sowohl mit dem Grundtone, als auch mit mehreren Obertönen 60 Stöße und ist daher „unvollkommen konsonant".

Wenn drei Töne gut zusammen klingen sollen, so müssen je zwei von ihnen ein wohlklingendes Intervall bilden. So gibt z. B. 300, 400 und 500 einen Wohlklang, weil 300 und 400 eine Quart, 400 und 500 eine große Terz und 300 und 500 eine große Sext bilden. Septimen werden in der Musik nicht mehr benutzt, weil sie dieser Bedingung nicht entsprechen. An und für sich bilden zwar zwei Töne, deren Schwingungszahlen sich wie 4 : 7 verhalten, einen Wohlklang, aber der eine Ton klingt nicht gut mit den wohlklingenden Intervallen des anderen. Die Oktav des tieferen Tones klingt z. B. schlecht mit dem höheren. — Weniger wohlklingend als die Septime ist die kleine Sext, deren Töne sich wie 5 : 8 verhalten. Sie wird aber trotzdem benutzt, weil jeder der beiden Töne mit den Obertönen des anderen gut zusammenklingt.

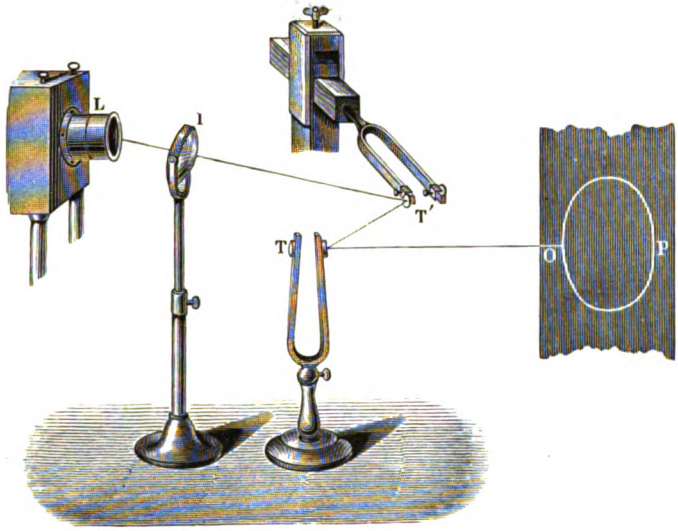
§ 366. Der französische Physiker Lissajous hat im Jahre 1863 sehr schöne Lichtwirkungen mit Hilfe von Stimmgabeln hervorgebracht, welche wohlklingende Intervalle bilden.

Zwei Stimmgabeln sind auf der Außenseite des einen Zinkens mit einem kleinen Spiegelchen versehen. Die eine Stimmgabel, T' (Fig. 341), schwingt in einer horizontalen Ebene, die andere, T, in einer vertikalen Ebene. Ein kräftiger Lichtstrahl kommt von der Laterne L durch die Linse I auf das Spiegelchen der Stimmgabel T', wird von diesem auf das Spiegelchen der Stimmgabel T geworfen und trifft nach einer nochmaligen Reflexion den Schirm OP. Die Spiegel sind so geschliffen, daß der Lichtstrahl auf dem Schirm einen scharf begrenzten hellen Fleck bildet. Wenn nun T' allein in Schwingung versetzt wird, so schwingt der Strahl $T'T$ und ebenso der Strahl TO hin und her, so daß der Lichtpunkt auf dem Schirm auf einer horizontalen Linie zwischen O und P hin- und hergeht. Wird die andere Stimmgabel allein in Schwingung versetzt, so bewegt sich der Lichtfleck auf einer vertikalen Linie auf und ab. Wenn die Stimmgabeln beide schwingen, so macht der Lichtfleck beide Bewegungen zugleich. Die Gestalt der Kurve, welche dann der Lichtfleck auf dem Schirm beschreibt, hängt von dem Verhältnis der Schwingungszahlen der beiden Stimmgabeln ab.

Digitized by Google

Befinden sich die beiden Töne im Einklang, so beobachtet man eine der fünf obersten Figuren (Fig. 342). Wenn die Zinken beider Gabeln gleichzeitig am weitesten ausgespreizt sind, so wird sich der Lichtfleck gleichzeitig am weitesten links und am weitesten unten befinden. Der Lichtfleck bewegt sich dann gleichzeitig nach rechts und nach oben und beschreibt die in der ersten der fünf Figuren dargestellte gerade Linie. Ist der Punkt rechts

Fig. 341.



Lissajous' schwingende Stimmgabeln.

oben angekommen, so geht er wieder auf derselben Linie nach links unten zurück. Ist aber die Gabel T' der Gabel T um eine Viertel-Schwingungszeit voraus, so ist der Lichtfleck gleichzeitig am weitesten unten und in der Mitte zwischen links und rechts, und er beschreibt jetzt die mittelste der fünf obersten Figuren. Von „mitten unten" geht nämlich der Fleck nach rechts oben und er ist am weitesten rechts, wenn er halb oben ist. Dann geht er nach links, aber weiter nach oben, so daß er in der Mitte oben ist, dann weiter nach links, aber abwärts, so daß er am weitesten links ist, wenn er halbwegs unten ist, und schließlich nach rechts, aber weiter abwärts, bis er an den Ausgangspunkt zurückkommt, u. s. w. — Wenn der Vorsprung der einen Bewegung gegen die andere eine halbe Schwingungszeit ist, d. h. wenn die Gabel T' in der innersten Stellung ist, wenn die andere in der äußersten ist, so entsteht, wie man sich leicht überzeugen wird, die letzte von den fünf oberen Figuren. Wenn endlich der Vorsprung $^1/_8$ oder $^3/_8$ der Schwingungszeit beträgt, so entsteht die zweite oder die vierte Figur, die ein Mittelding zwischen der ersten und der dritten oder der dritten und der fünften ist.

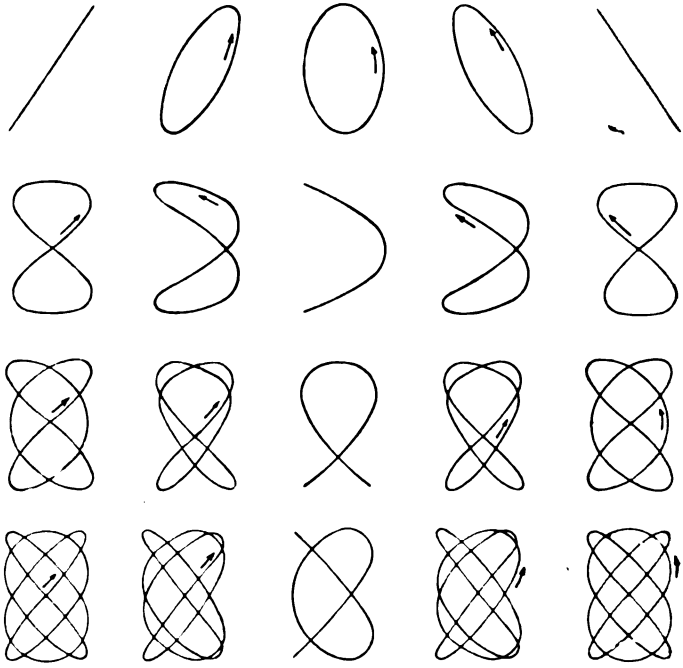
Wenn nun die Gabeln nicht in absolutem Einklang sind und die Schwin-

Digitized by Google

gung mit der erſten Figur anfängt, ſo bekommt die eine Gabel nach und nach einen immer größeren Vorſprung vor der anderen und infolgedeſſen geht die eine Figur allmählich in die nächſtfolgende über. Auf dieſe Weiſe kann man den allergeringſten Unterſchied in der Schwingungsdauer der Gabeln entdecken.

Wenn die Stimmgabel T' doppelt ſo ſchnell ſchwingt als T, wenn alſo die beiden Gabeln Grundton und Oktav ſchwingen, ſo entſteht eine der fünf Figuren der zweiten Gruppe. Auch hier geht jede der Figuren in die folgende

Fig. 342.



Lissajousſche Figuren.

über, ſobald die Stimmung nicht abſolut genau iſt. Die dritte und vierte Gruppe von Zeichnungen ſtellen die Figuren vor, welche entſtehen, wenn die Gabeln Grundton und Quint, bezw. Grundton und Quart ſchwingen. Verfolgt man z. B. die erſte Figur der Quart von links unten an in der Richtung des Pfeiles, bis man wieder zum Ausgangspunkt zurückkommt, ſo wird man leicht bemerken, daß man viermal nach rechts und viermal nach links gegangen iſt, aber nur dreimal nach oben und dreimal nach unten, weil die Gabel T' vier Schwingungen macht, während T nur drei macht. Etwas ähnliches gilt für alle anderen Figuren.

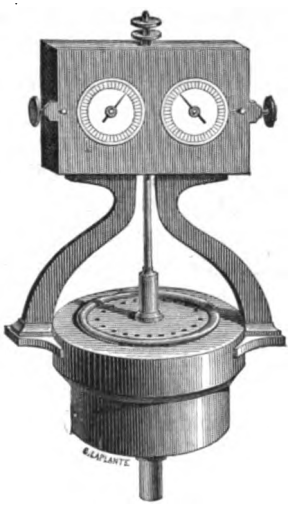
§ 367. Die Beſtimmung der Schwingungszahl eines Tones läßt ſich in verſchiedener Weiſe ausführen. Das wichtigſte Verfahren beſteht darin, daß

Digitized by Google

man einen Luftstrom auf mechanischem Wege unterbricht und öffnet, so daß in der Sekunde eine bestimmte Anzahl von Luftstößen hervorgebracht wird. Ein englischer Physiker namens Robison erzielte dies durch einen künstlichen Hahn, Seebeck dadurch, daß Luft durch ein Rohr gegen eine schnell rotierende Pappscheibe geblasen wurde, in der sich ein Kreis von Löchern befand. Durch jedes dieser Löcher trat während des Vorübergehens vor der Mündung des Rohres ein Luftstrom aus.

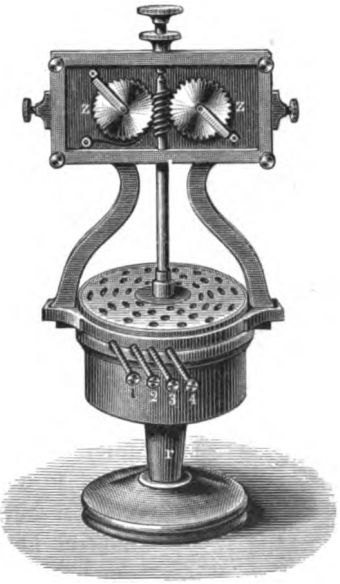
Am besten werden diese Versuche mit der Sirene (Fig. 343) ausgeführt, die zuerst von Cagniard de Latour konstruiert und später von Dove, Helmholtz u. a. verbessert worden ist. Eine horizontale, kreisförmige Scheibe an einer vertikalen Achse hat eine Anzahl von Löchern, die in gleichen Abständen voneinander in einem Kreise um die Achse angeordnet sind.

Fig. 343.



Sirene.

Fig. 344.



Akkordsirene.

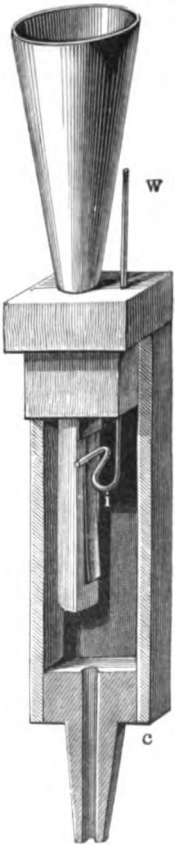
Diese Löcher gleiten über eine entsprechende Reihe von Löchern in der Deckplatte einer zilindrischen Büchse, in die durch einen Blasebalg Luft eingepreßt wird. Wenn die Löcher in der Scheibe über den Löchern in der Deckplatte stehen, so strömt die Luft aus. Stehen dagegen die Löcher der Scheibe über den Zwischenräumen zwischen den Löchern der Deckplatte, so ist der Luftstrom unterbrochen.

Nun sind die Löcher in der Scheibe nach der einen Seite hin, die Löcher in der Deckplatte nach der anderen Seite hin schief gebohrt. Infolgedessen drückt die ausströmende Luft gegen die Wände der Durchbohrungen der beweglichen Scheibe und setzt diese in Rotation. Ein besonderer Umdrehungs-

Digitized by Google

mechanismus ist daher nicht erforderlich. Die Scheibe wird durch den Luftstrom in Bewegung gesetzt, und wenn dieser gleichförmig ist, so bleibt die Umdrehungsgeschwindigkeit und folglich auch die Tonhöhe ziemlich unverändert. Am oberen Teil der Achse befindet sich eine „Schraube ohne Ende", durch die

Fig. 345.



Zungenpfeife.

Fig. 346.

Zungenpfeife aus einem Getreidehalm.

ein Zählwerk getrieben wird. Die Schwingungszahl des Tones ist gleich dem Produkt aus der Anzahl der Löcher und der Anzahl der Umdrehungen.

§. 368. Die Höhe des Tones, welcher von einer Lippenpfeife hervorgebracht wird, hängt von der Länge der Pfeife ab. Der Grundton einer gedeckten Pfeife bildet mit dem Grundton einer offenen Pfeife von gleicher Länge eine Oktav.

In den Zungenpfeifen befindet sich eine elastische Zunge, durch deren Schwingungen die Öffnung für den Luftstrom abwechselnd geschlossen und geöffnet wird. Die Zunge kann nun so geformt sein, daß sie oder ein Teil von ihr in verschiedenen Takten schwingen kann, namentlich wenn die Zunge weich ist. In diesem Falle kann sie sich leicht der Länge des Rohres anpassen, mit dem sie in Verbindung steht und deren Luft nur in der in § 360 angegebenen Weise schwingen kann. Man stimmt eine solche Zunge jedoch in der Regel so ab, daß ihre natürlichste Schwingungsdauer mit der durch die Länge des Rohres bestimmten annähernd übereinstimmt. Dann wird nämlich der Ton am kräftigsten und reinsten. Zuweilen bringt man auch einen Schieber aus Draht an (Fig. 345), durch dessen Verschiebung ein geeignetes Stück der Zunge abgegrenzt werden kann. Aus Fig. 345 ist die innere Einrichtung einer Zungenpfeife ersichtlich. Die Luft wird in den unteren Behälter eingeblasen und entweicht aus diesem stoßweise durch die Öffnung, in welcher die Zunge in das Rohr hineinschwingt, welches für die Höhe des Tones maßgebend ist und welches durch einen trompetenförmigen Ansatz verlängert ist. Früher waren vorzugsweise die sogenannten aufschlagenden Zungen in Gebrauch, die bei jeder Schwingung auf den Rahmen der Öffnung aufschlagen, diese also vollständig verschlossen, während man jetzt mehr die durchschlagenden Zungen verwendet, die in der Öffnung frei hin- und herschwingen, ohne sie vollständig zu verschließen.

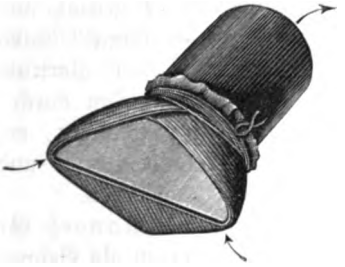
Digitized by Google

Bei Instrumenten ohne Rohr, wie z. B. bei der Harmonika, hängt die Höhe des Tones ausschließlich von der Zunge ab, so daß diese genau auf den Ton, den sie hervorbringen soll, abgestimmt sein muß.

Im Freien kann man sich aus verschiedenen Pflanzen Zungenpfeifen anfertigen, z. B. aus einem Getreidehalm, indem man von demselben ein Stück von ungefähr 20 cm Länge abschneidet, welches an dem einen Ende durch einen Knoten verschlossen ist, und dann gegen den Knoten hin einen Schnitt führt, durch den eine Öffnung von 2 bis 3 cm nebst einer dazu passenden Zunge entsteht. Beim Hineinblasen erhält man den der Länge des Rohres entsprechenden Ton. Schneidet man am offenen Ende ein Stück ab, so entsteht beim Blasen ein höherer Ton, ein Beweis, daß die Länge des Rohres für die Tonhöhe maßgebend ist. Quetscht man eine Röhre aus Weidenrinde oder ein Stück eines frischen Getreidehalms an dem einen Ende zusammen, nimmt dieses Ende in den Mund und bläst in die Röhre, so bekommt man einen Ton, dessen Höhe im wesentlichen durch die Länge der Röhre bestimmt wird.

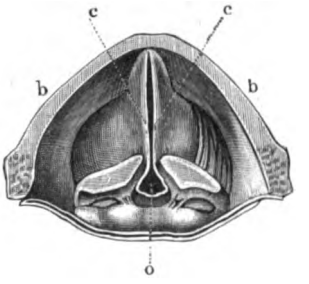
Bei den Pfeifen der letzteren Art ist die Zunge allerdings durch zwei Bänder oder Membranen ersetzt, allein man rechnet auch diese Art zu der

Fig. 347.



Helmholtzsche Spaltpfeife.

Fig. 348.



Querschnitt durch den Kehlkopf.

Gruppe der Zungenpfeifen. Hierher gehören auch die sogenannten Spaltpfeifen von der durch Fig. 347 veranschaulichten Einrichtung. Ein Rohr ist am Ende von zwei Seiten her schräg abgeschnitten, so daß die beiden Schnittflächen annähernd einen rechten Winkel miteinander bilden. Über die Schnittflächen sind zwei Gummibänder so gelegt, daß sie einen schmalen Spalt bilden. Mit den Enden sind die Gummistreifen um das Rohr herumgelegt und mit einem Faden festgebunden.

§ 369. Der zuletzt erwähnte Apparat hat einige Ähnlichkeit mit dem eigentlichen Stimmorgan des menschlichen Kehlkopfes (Fig. 348). Dieser besteht im wesentlichen aus zwei elastischen Bändern, den Stimmbändern, die durch einige Muskeln gespannt werden können, so daß sie die Luftröhre bis auf einen schmalen Spalt, die Stimmritze, schließen. Nur wenn man einen Ton hervorbringen oder kräftig Atem schöpfen will, werden die Bänder gespannt. Sonst

Digitized by Google

hängen sie schlaff zur Seite, so daß das ruhige Atmen ohne merkliches Geräusch erfolgt.

Will man dagegen einen Ton singen, so werden die Stimmbänder gespannt, und die Luft wird durch die Stimmritze herausgetrieben. Die Stimmbänder schwingen dann in einem bestimmten Takt, der von dem Grade der Spannung abhängt. Von der Rohrverlängerung, die vom Schlund und der Mundhöhle gebildet wird, wird er nicht wesentlich beeinflußt. Die Wände derselben sind zu weich, als daß sie die Stimmbänder zwingen könnten, sich der von ihr bestimmten Schwingungszeit anzupassen. Dagegen hat man selbst innerhalb gewisser Grenzen die Spannung der Stimmbänder und also die Tonhöhe in der Gewalt. Diese Grenzen sind aber bei verschiedenen Personen verschieden. Eine männliche Baßstimme kann bis auf 81, ja ausnahmsweise bis auf 44 Schwingungen in der Sekunde herabgehen. Eine weibliche Tenorstimme kann bis 1381 in die Höhe gehen. Man kennt sogar einen Fall, in dem eine Stimme 2069 Schwingungen erreichte. Beim Schreien können natürlich noch höhere Töne hervorgebracht werden.

Um bestimmte Töne hervorzubringen, ist nicht nur Kenntnis der Töne, sondern auch eine gewisse Herrschaft über die Stimmbänder erforderlich. Hier spielt natürlich die Übung eine große Rolle. Für die Schönheit des Gesanges ist es auch von großer Bedeutung, wie die Stimmbänder gebaut sind und wie sie schwingen. Dies läßt sich mit Hilfe des Kehlkopfspiegels beobachten. Man hat z. B. gefunden, daß ein weicher, klangvoller Ton glattrandigen, gut schließenden Stimmbändern entspricht, daß ein harter Ton durch rauhe und sich zuweilen berührende Stimmbänder erzeugt werden kann, daß ein Schleimpartikelchen die Stimme ihres Wohlklanges berauben kann und daß blutgefüllte und gereizte Stimmbänder einen tieferen Ton geben.

Der Erfinder des Kehlkopfspiegels ist der bekannte Manuel Garcia (geb. 1805 in Madrid), der in Paris und später in London als Gesanglehrer tätig war und seinen Unterricht auf physiologische Studien gründete.

Die Spannung der Stimmbänder ist zwar in der Regel dem Willen unterworfen, aber sie kann auch unmittelbar durch Gemütsstimmungen bestimmt werden. Man spricht in einem anderen Tone, wenn man fröhlich oder wenn man traurig ist, wenn man mutig oder wenn man furchtsam ist, wenn man der Bewunderung oder wenn man der Verachtung Ausdruck verleiht. Dieser Zusammenhang der Gemütsstimmung mit dem Klange des Stimmorganes spielt, wie in der neueren Zeit von Spencer hervorgehoben worden ist, in dem Werden und Wirken der Musik eine wichtige Rolle.

§ 370. Während es die Stimmbänder sind, die einen Ton hervorbringen, ist es offenbar der Mund, der die dem einzelnen Buchstaben entsprechenden Laute, die Silben und die Worte bildet.

Die Gesetze der Lautbildung sind in neuerer Zeit von zahlreichen Forschern teils experimentell, teils theoretisch untersucht worden, so von Kratzenstein, der 1796 durch Konstruktion einer Sprechmaschine einen von der Petersburger Akademie ausgesetzten Preis gewann, und von dem berühmten

Digitized by Google

holländischen Physiologen und Augenarzt Frans Cornelis Donders (1818 bis 1889), der sich namentlich um die Theorie der Brillen und deren Anwendung für astigmatische Augen verdient gemacht hat. Von anderen Forschern auf diesem Gebiete sind die Engländer Willis und Wheatstone, sowie der Österreicher v. Kempelen, der ebenfalls eine Sprechmaschine konstruierte, hervorzuheben. Als Helmholtz diesen Gegenstand in Angriff nahm, lag also eine ganze Menge wertvoller Arbeiten über die Natur der Buchstaben vor, ja sogar verschiedene Versuche, diese Laute künstlich hervorzubringen. Die Arbeiten von Helmholtz bilden eine schöne und vollständige Erklärung der physikalischen Natur der menschlichen Stimme, die sich teils auf frühere, teils auf seine eigenen Untersuchungen stützt. Helmholtz hatte für diese Studien ein vorzügliches Mittel in seinen Resonatoren, aber wo diese nicht ausreichten, da verstand er es, andere oft sinnreich ausgedachte Hilfsmittel zu Rate zu ziehen.

§ 371. Die Untersuchungen über die Natur der Vokale hatte das Ergebnis, daß der Klang derselben dadurch entsteht, daß der von den Stimmbändern hervorgebrachte Ton von gewissen Obertönen begleitet wird. Wenn man die Vokalklänge graphisch darstellen wollte, so würde die Zeichnung aus einer Wellenlinie mit feinen Kräuselungen auf den großen Bogen bestehen. So fand Helmholtz, daß die Klangfarbe der verschiedenen Vokale durch die folgenden Obertöne bewirkt wird. Er unterschied ein dumpfes *ŭ* und ein mehr offenes *u*. Es wird hervorgebracht

ŭ	durch	den	Ton	f	mit	176	Schwingungen
u	„	„	„	f_1	„	352	„
o	„	„	„	b_1	„	475	„
a	„	„	„	b_2	„	950	„
ä	„	„	„	d_2 / g_3	„	594 / 1584	„
e	„	„	„	f_1 / b_3	„	352 / 1900	„
i	„	„	„	f / d_4	„	176 / 2374	„
ö	„	„	„	f_1 / cis_3	„	352 / 1100	„
ü	„	„	„	f_1 / g_3	„	352 / 1584	„

Der Klang von *u*, *o* und *a* wird also durch einen einzigen Ton, der Klang der übrigen Vokale durch zwei, zum Teil sehr hohe Töne bewirkt.

§ 372. Helmholtz erklärt ferner, wie diese höheren Töne hervorgebracht werden.

Die Wände der Mundhöhle sind zu weich, um den Stimmbändern den durch die Länge und die Form der Mundhöhle bestimmten Ton aufzwingen zu können. Die Höhe des Tones ist vielmehr durch die Spannung der

Digitized by Google

Stimmbänder bestimmt. Aber Teile der Bänder können immer in dem durch die Rohrlänge (Mundhöhle) bestimmten Takt schwingen. Bei den Vokalen *u*, *o*, *a* bildet die ganze Mundhöhle einen Raum, da die Zunge im allgemeinen unten gehalten wird. Bei *u* ist die Mundhöhle vorn fest geschlossen, bei *o* etwas offen, wie ein Rohr, bei *a* noch mehr, wie eine Trompete. Das geschlossene Rohr gibt den tiefsten Ton (vergl. § 361) für *u*, das mehr offene Rohr die höheren Töne für *o* und für *a*.

Bei den übrigen Vokalen *ä*, *e*, *i*, *ö* und *ü* wird die Zunge etwas gegen den Gaumen gehoben. Hierdurch entsteht einesteils ein Rohr im hinteren Teil des Mundes und anderenteils ein mehr oder weniger geschlossener Raum zwischen der Zunge und den Lippen. Die Mitwirkung der Zunge bei dem Aussprechen der genannten Vokale ist leicht wahrzunehmen, und man kann sich z. B. leicht davon überzeugen, daß die Zunge beim Aussprechen von *ä* und *ü* (1584 Schwingungen) dieselbe Stellung beibehalten kann, während sich die Lippen für *ä* (594 Schwingungen) mehr öffnen, für *ü* (352 Schwingungen) dagegen mehr schließen. Den höchsten Ton erreichen wir beim Aussprechen von *i*. Wenn man diesen Vokal bloß zu lispeln versucht, so bekommt man deutlich den Eindruck eines Pfeifentones (von 2374 Schwingungen), der in dem kleinen Rohr zwischen Zunge und Gaumen erzeugt wird. Wenn man *ü* lispelt, so erhält man einen anderen, tieferen Pfeifenton (von 1584 Schwingungen).

§ 373. Endlich hat Helmholtz durch physikalische Mittel vollkommen deutliche Vokale erzeugt. Eine Anzahl von Stimmgabeln, die in ähnlicher Weise, wie die in § 371 zusammengestellten Töne abgestimmt waren, wurden ähnlich wie eine elektrische Schelle durch einen elektrischen Strom in Schwingung erhalten. Vor jeder Stimmgabel befand sich ein Resonator mit einer Klappe vor der Mündung, die nach Belieben mehr oder weniger geöffnet werden konnte, so daß der ohne Resonator unhörbare Ton mehr oder weniger verstärkt wurde.

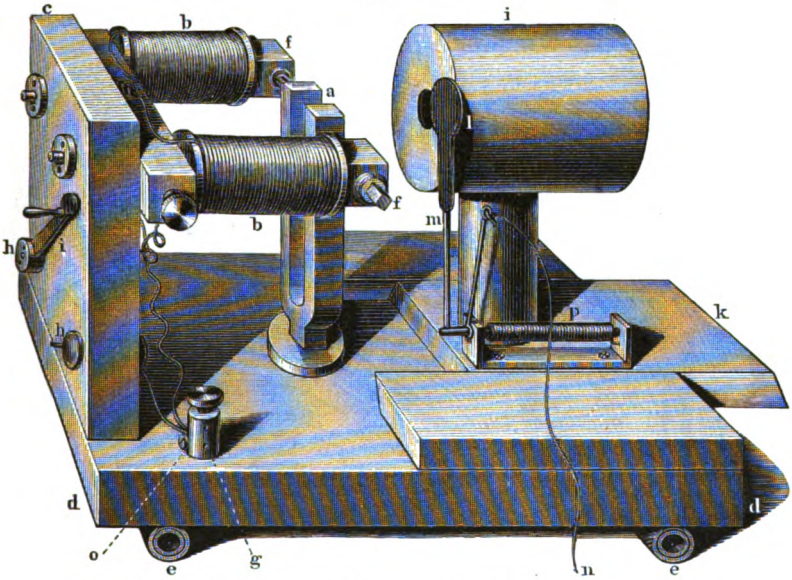
Es gelang Helmholtz, mit diesem Apparat durch richtiges Öffnen der Klappen alle Vokale hervorzubringen mit Ausnahme von *e* und *i*, die höhere Töne enthalten, als durch die Stimmgabeln des Apparates hervorgebracht wurden. Man kann nämlich den Stimmgabeln eines derartigen Apparates nicht jeden beliebig hohen Ton geben, wenn sie so stark schwingen sollen, daß die elektrischen Berührungen mit Sicherheit erfolgen.

§ 374. Während sich also ein Vokal als eine Welle darstellt, die durch die Stimmbänder erzeugt und durch die Mundhöhle gekräuselt wird, erzeugt ein Konsonant in der Regel eine oder einige wenige unregelmäßige Wellen, die die Wellenlinie der Vokale einleiten oder schließen. Der Vokal kann längere Zeit andauern, der Konsonant dagegen dauert in der Regel nur einen Augenblick. Er wird am häufigsten durch die Art und Weise hervorgebracht, wie man den Mund vor einem Vokal öffnet oder nach einem Vokal schließt. Das Öffnen der Mundhöhle kann in verschiedener Weise erfolgen, z. B. mit den Lippen (*b*, *p*, *m*) oder mit der Unterlippe an den oberen Vorderzähnen

Digitized by Google

(*f*, *v*) oder mit der Zungenspitze an denselben Zähnen (*t*, *d*) oder mit der Zunge am vorderen oder am hinteren Teil des Gaumens (*n*, *l*, *g*). Zuweilen wirken aber auch andere Umstände mit. So erfordern *m* und *n* zugleich eine Resonanz in der Nasenhöhle, die hinten mit der Mundhöhle in Verbindung steht. Diese Resonanz kann man längere Zeit wie einen Vokal andauern lassen. Dasselbe gilt von einigen anderen Lauten, die wir Konsonanten zu nennen pflegen, die aber in anderen Sprachen, z. B. im Sanskrit, als Zischlaute (*s*) bezeichnet werden. Eine ganz besondere Stellung nimmt das *r* ein. Es besteht nicht aus einer Einleitungswelle oder einer Schlußwelle, sondern es dient gewissermaßen dazu, einen Vokal zu zerhacken. Die

Fig. 349.



Helmholtzscher Stimmgabelapparat zur Erzeugung der Vokale.

Zunge vibriert am Gaumen und gestattet jedesmal, wenn sie sich von diesem entfernt, die Bildung eines Stückes des betreffenden Vokals.

§ 375. Auch mit Hilfe von Pfeifen hat man die menschliche Stimme nachzuahmen versucht. Die älteren sogenannten Sprechmaschinen bestanden im wesentlichen aus einer Anzahl von Pfeifen, die in ähnlicher Weise wie die Stimmgabeln des Helmholtzschen Apparates abgestimmt waren. Die Pfeifen wurden ähnlich wie bei einer Orgel durch einen Blasebalg angeblasen, indem den einzelnen Pfeifen die Luft vermittelst einer Klaviatur zugeführt wurde. Der Luftstrom trat durch Öffnungen mit Lederlippen und anderen Vorrichtungen aus. Das *r* wurde durch ein Rädchen hervorgebracht, welches in der künstlichen Mundhöhle schnurrte und die Wellenreihe des Vokals zerstückelte. Diese Art, die menschliche Stimme nachzuahmen, war insofern von

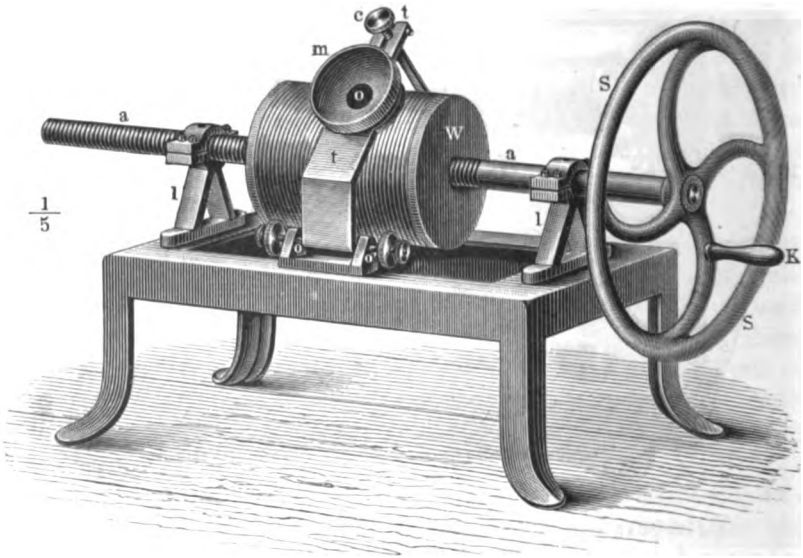
Digitized by Google

Interesse, als sie einen handgreiflichen Beweis dafür bildete, daß man die Natur der Sprache richtig verstanden hatte. Die so hervorgebrachten Sprachlaute waren allerdings sehr unvollkommen und namentlich ganz monoton. Es fehlte jede Variation des Grundtons, die bei der menschlichen Sprache immer vorhanden ist, und zwar um so stärker, je stärker die Sprache von der Gemütsstimmung beeinflußt wird (§ 369).

§ 376. Eine Sprechmaschine ganz anderer Art ist der 1877 von Edison erfundene Phonograph. Derselbe nimmt die menschliche Sprache, Musik und andere Laute auf und gibt sie später, wenn es verlangt wird, zurück.

Fig. 350 zeigt den Phonographen in seiner ursprünglichen Form. Man spricht durch die Öffnung *o* in ein kurzes Rohr hinein, welches am anderen

Fig. 350.



Edisons Phonograph.

Ende durch eine dünne elastische Platte verschlossen ist. In der Mitte dieser Platte ist eine kleine Metallspitze befestigt. Diese steht einer Stahlwalze *W* gegenüber, in die eine spiralförmige Rinne eingedreht ist. Diese wird von einem um die Walze gelegten Stanniolblatt bedeckt. Das Mundstück *m* muß nun so eingestellt werden, daß die erwähnte Spitze über der Rinne mit gelindem Druck auf dem Stanniolblatt ruht. Wenn die Walze gedreht wird, verschiebt sie sich zugleich in der Richtung der Achse, so daß die Metallspitze immer über der Rinne bleibt. Wenn nun während der Drehung in das Mundstück *m* hineingesprochen wird, so kommt die elastische Platte in Schwingung und die Metallspitze erzeugt in dem Stanniolblatt entsprechende

Digitized by Google

Vertiefungen. Dann wird das Mundstück von der Walze entfernt und diese in die ursprüngliche Stellung zurückgedreht. Wenn dann das Mundstück wieder in die frühere Lage gebracht und die Walze in Drehung versetzt wird, so kommt der Metallstift wieder in die Vertiefungen des Stanniolblattes und infolgedessen macht die elastische Platte wieder dieselben Bewegungen, die während der ersten Drehung durch die Schallwellen hervorgebracht wurden. Daher entstehen auch in der Luft wieder dieselben Wellen, d. h. die schwingende Platte bringt wieder dieselben Töne hervor, durch die sie in Bewegung gesetzt worden war.

Edison hat später den Phonographen bedeutend verbessert. Das Stanniolblatt empfängt und reproduziert nur die gröbsten Bestandteile des Schalles. Viel vollkommener wird von einer Walze von hartem Wachs die Schallbewegung aufgenommen und wiedergegeben. Die Umdrehung, die natürlich sehr gleichmäßig sein und bei der Wiedergabe der Töne mit derselben Geschwindigkeit erfolgen muß wie bei der Aufnahme, wird durch einen kleinen Elektromotor bewirkt. Wenn man die Geschwindigkeit steigert, so folgen die einzelnen Töne, z. B. die gesprochenen Worte, nicht nur schneller aufeinander, sondern sämtliche Töne werden auch höher.

§ 377. Das menschliche Ohr ist im wesentlichen ein rein mechanischer Apparat, der natürlich mit Nerven versehen ist zur Wahrnehmung der Bewegungen, die durch die mechanischen Teile von den Luftwellen auf den Hörnerven übertragen werden. Unter den mechanischen Apparaten ist aber das Ohr ohne Zweifel der feinste, der überhaupt existiert. Die geringe Menge Energie, welche wir ein Fußpfund nennen (ungefähr $^1/_6$ Meterkilogramm), würde nämlich hinreichen, länger als 3000 Jahre einen für das Ohr wahrnehmbaren Ton zu erzeugen.

Das Ohr setzt uns nicht nur von dem Vorhandensein von Schallwellen überhaupt in Kenntnis, sondern es belehrt uns auch darüber, wie diese Wellen beschaffen sind, d. h. wir bekommen von jeder bestimmten Art von Wellen einen besonderen Eindruck. Was speziell die musikalischen Töne betrifft, so empfindet das Ohr solche von 16 bis ungefähr 40 000 Schwingungen in der Sekunde. Die untere Grenze ist allerdings etwas von der Stärke der Töne und von der Art und Weise abhängig, wie sie hervorgebracht werden. Die obere Grenze ist bei verschiedenen Menschen ziemlich verschieden. Man erkennt leicht die Verschiedenheit aller dieser Töne, in der Nähe der oberen Grenze allerdings nicht ganz sicher. In der Musik braucht man in der Regel nur die Töne von 40 bis 4000 Schwingungen, also ungefähr sieben Oktaven.

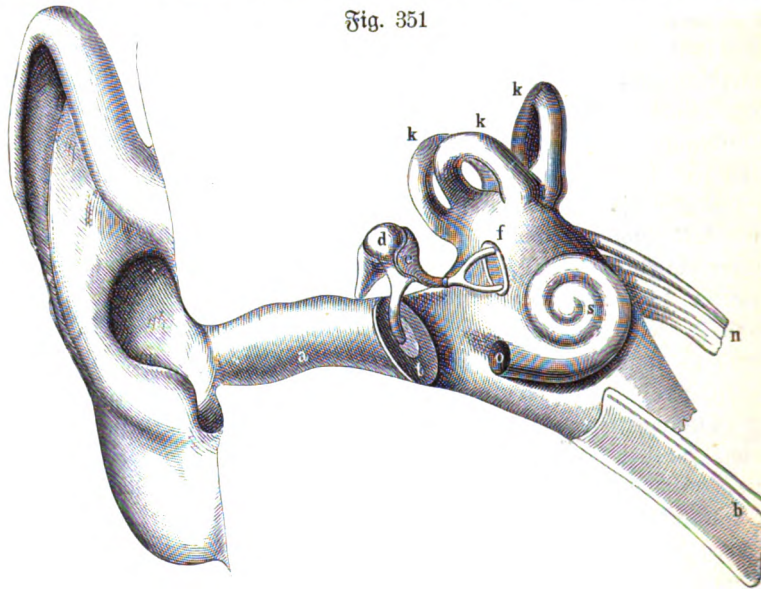
Auch die Form der einzelnen Wellen, d. h. die Klangfarbe der verschiedenen Töne, kann das Ohr unterscheiden. Ja noch mehr, das Ohr kann eine ganze Anzahl von Wellen gleichzeitig wahrnehmen und den von diesen Wellen gebildeten Komplex sozusagen in seine einzelnen Bestandteile zerlegen.

Dieses wunderbare mechanische Instrument ist natürlich von Anatomen und Physikern sehr eingehend untersucht worden. Von den Ergebnissen dieser

Digitized by Google

Unterſuchung ſind als die wichtigſten die folgenden hervorzuheben. Die Ohrmuſchel ſammelt die Schallwellen und der Gehörgang (*a*) leitet ſie nach dem Trommelfell (Fig. 351, *t*). Das Trommelfell trennt den Gehörgang von der Paukenhöhle, die ebenfalls mit Luft gefüllt iſt und in der ſich drei kleine Knöchelchen, der Hammer, der Amboß und der Steigbügel, befinden. Die Paukenhöhle ſteht durch die Euſtachiſche Röhre mit dem Schlund in Verbindung. Dieſe Röhre wurde zuerſt von dem italieniſchen Arzt und Anatom Bartolomeo Euſtachio (geſt. 1574) beſchrieben. Die Röhre öffnet ſich,

Fig. 351



Das Gehörorgan.

wenn man ſchluckt oder gähnt und ſie bewirkt daher, daß der Luftdruck in der Paukenhöhle ſtets gleich dem äußeren Luftdruck iſt. Dies iſt notwendig, weil ſonſt eine Änderung des äußeren Luftdruckes eine Spannung des Trommelfelles zur Folge haben würde. Eine plötzliche Änderung des Luftdruckes bewirkt Ohrenſauſen, welches aber verſchwindet, wenn man etwas Speichel hinabſchluckt.

Die drei genannten Knöchelchen ſtellen eine Verbindung her zwiſchen dem Trommelfell und einem Häutchen, welches das „ovale Fenſter“ ſchließt, gegen das der Steigbügel wie ein Stempel wirkt. Da das innere Ohr, in welches das ovale Fenſter hineinführt, Waſſer enthält, ſo muß der Druck hier kräftig ſein. Die genannten mechaniſchen Verbindungsglieder ſind daher ſo angeordnet, daß ſie die Größe der Bewegung vom Trommelfell bis zum Fenſter auf ungefähr $^1/_{20}$ vermindern, ſo daß die Kraft nach dem Prinzip der virtuellen Geſchwindigkeiten (§ 134) in demſelben Grade erhöht wird. Das Häutchen, welches das ovale Fenſter verſchließt, iſt daher auch um $^1/_{15}$

Digitized by Google

bis $^1/_{20}$ so groß wie das Trommelfell. Auch die eigentümliche Form des Trommelfelles trägt zu dieser Umformung von Bewegung und Druck wesentlich bei. Es ist nämlich nicht eben, sondern nach innen etwas trichterförmig, und der Griff des Hammers berührt es in der Mitte. Die Seitenlinien des Trichters sind aber nicht gerade, sondern nach außen hin etwas gekrümmt. Helmholtz weist nun darauf hin, daß eine Schallwelle die Krümmung der Seitenlinien ganz erheblich ändern kann, ohne daß sich die Enden merklich verschieben, ähnlich wie sich die Enden eines Bogens einander nicht bedeutend nähern, wenn Bogen und Sehne beträchtlich voneinander entfernt werden. Infolgedessen wird die größere Bewegung der Schallwelle zu einer bedeutend geringeren am Befestigungspunkt des Hammers umgesetzt, während Druck und Zug in demselben Grade verstärkt werden.

Das innere Ohr, welches diese feinen Bewegungen empfangen und unterscheiden soll, muß natürlich gegen die Einwirkung fremder Erschütterungen gut geschützt sein. Es ist daher ringsum von sehr starken Knochen umgeben. Der mit Wasser gefüllte Raum, das Labyrinth, besteht aus drei Abteilungen, dem Vorhof, den Bogengängen oder halbkreisförmigen Kanälen und der Schnecke. An der letzteren befindet sich eine durch eine Haut geschlossene Öffnung, das runde Fenster (*o*). Wenn dieses Fenster nicht vorhanden wäre, so würde die Haut des ovalen Fensters nicht durch den Steigbügel bewegt werden können, da die Wand des Labyrinths, mit Ausnahme der beiden Fenster, aus Knochen besteht. Die Schallbewegung pflanzt sich vom ovalen Fenster nach dem runden Fenster durch die Flüssigkeit fort und wirkt auf die in dieser Flüssigkeit liegenden Organe.

Zu diesen gehören außer den fein verteilten Fasern der Hörnerven im Vorhof kleine kalkartige Körperchen (Otolithen, Hörsand) und in den Bogengängen feine Haare, die ohne Zweifel durch gewisse Schwingungen in Bewegung gesetzt werden, da sie mit Nervenfasern in Verbindung stehen. Man vermutet, daß der Hörsand dadurch eine Rolle spielt, daß die Sandkörner eine größere Masse als die Hörhaare haben, daß sie also nicht so schnell in Bewegung gesetzt werden wie diese, aber die Bewegung länger beibehalten, während die Hörhaare infolge ihrer geringen Masse leichter in Bewegung kommen, diese aber schneller verlieren, so daß sie jederzeit zur Aufnahme einer neuen Bewegung bereit sind.

Das merkwürdigste Organ ist jedenfalls die Schnecke. Sie wird durch eine Scheidewand in ihrer ganzen Länge in zwei Gänge, die Vorhofstreppe und die Paukentreppe, geteilt. Die erstere mündet frei im Vorhof, die letztere endet an der Haut des runden Fensters. In der Spitze der Schnecke stehen die beiden Gänge durch ein Loch in der Scheidewand in Verbindung, und die Paukentreppe ist an einer Stelle nur durch ein dünnes Häutchen vom Vorhof getrennt. Die Scheidewand selbst ist zum Teil knochenartig, zum Teil hautartig. Der hautartige Teil ist doppelt und enthält das sogenannte Cortische Organ, welches 1851 vom Italiener Graf Corti entdeckt worden ist. Es erinnert in hohem Grade an ein sehr kompliziertes Saiteninstrument.

Digitized by Google

Es besteht aus zahlreichen Stäbchen, deren je zwei einen Bogen bilden und die mit Fasern und Haaren in Verbindung stehen, zwischen denen sich die Nervenfasern verzweigen.

Man hat in dem Cortischen Organ das Instrument zu erkennen geglaubt, in dem jeder einzelne Ton, dessen Schwingungen sich vom ovalen Fenster bis zum runden Fenster durch die Schnecke fortpflanzen, in der sogenannten sympathischen Weise (§ 355) die mit dem Ton stimmende Saite in Schwingung bringt. Diese Schwingung wird dann durch den betreffenden Nerven zum Bewußtsein gebracht. Wenn diese Vermutung richtig ist, dann ist es zu verstehen, daß jeder Ton seinen besonderen Eindruck hervorbringt. Denn, wenn jeder Ton auf seine Saite wirkt und von seinem besonderen Nerven gemeldet wird, so gewöhnt man sich daran, die Meldung in Beziehung auf die Nervenfaser aufzufassen, durch die er gebracht wird. Ein Nerv im Ohr wird es sicherlich ebenso wenig wie ein Nerv in einer Fingerspitze unterscheiden, ob er von einer Schwingung in der Sekunde 300mal oder 400mal getroffen wird. Dagegen wird das Bewußtsein leicht unterscheiden, ob es der 300-Wellennerv oder der 400-Wellennerv ist, welcher meldet, ebenso wie es unterscheidet, ob eine Meldung vom Zeigefinger oder vom Mittelfinger kommt.

Übrigens ist der Bau und die Wirkung des Cortischen Organes trotz der sorgfältigsten Untersuchungen noch nicht vollständig aufgeklärt, und die angedeutete Auffassung ist mehr Vermutung als wirkliche Erkenntnis.

Daß aber der Mechanismus befähigt ist, seine wunderbare Aufgabe zu lösen, ist Tatsache, und es ist nicht zu bezweifeln, daß man es hier mit einem Instrumente von einer Feinheit zu tun hat, die in der ganzen Welt nicht ihresgleichen hat. Es kann aber auch für einen Mechanismus keine höhere Aufgabe geben, als ein Werkzeug für die Aufnahme eines geistigen Inhaltes zu sein.

Digitized by Google

Die Natur des Lichtes.

Digitized by Google

Digitized by Google

Die Farben.

§ 378. Aristoteles wußte (vergl. § 108), daß man einen Gegenstand, der ganz dicht vor das Auge gehalten wird, nicht sehen kann. Er hatte auch beobachtet, daß ein und derselbe Gegenstand verschieden gefärbt erscheinen kann je nach dem Stoff, durch den das Licht auf dem Wege von dem Gegenstande nach dem Auge hindurchgeht. So erscheint die Sonne rot, wenn sie durch Nebel hindurch gesehen wird, während sie bei klarem Wetter mit weißem Lichte leuchtet. Diese Verschiedenheit in der Färbung der Sonne rührt nach Aristoteles' Meinung daher, daß sich das Licht der Sonne im Nebel mit „Dunkelheit" vermischt, und die rote Farbe ist eine Mischung einer gewissen Menge Licht mit einer ganz bestimmten Menge „Dunkelheit". Wenn das Licht mit der Dunkelheit in einem anderen Verhältnis gemischt ist, so entstehen andere Farben, die man nach Aristoteles im Regenbogen beobachtet, welcher entsteht, wenn sich die Sonne in den dunkeln Wolken spiegelt. Die Farben sind also nach dieser Auffassung eine Mischung von Licht mit mehr oder weniger Dunkelheit. — Diese Betrachtungen des Aristoteles bilden ein ausgezeichnetes Beispiel, wie gefährlich es ist, Theorien auf vereinzelte Beobachtungen zu begründen. Die rote Farbe der Sonne wird allerdings durch den Nebel verursacht, aber sie rührt nicht von einer Beimischung von Dunkelheit her. Die rote Farbe wird vielmehr dadurch erzeugt, daß der Nebel etwas von dem Licht einsaugt. Die aristotelische Theorie galt aber, wie so viele andere von seinen Ansichten, das ganze Mittelalter hindurch als die richtige.

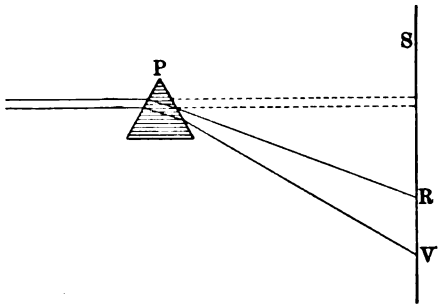
§ 379. Da die Griechen das Brennglas kannten (§ 94), kann man mit Sicherheit annehmen, daß sie auch wußten, daß die Regenbogenfarben entstehen, wenn das Licht in einem Brennglase gebrochen wird. Seneca (2 bis 66 n. Chr.) erwähnt in seinem großen naturwissenschaftlichen Werke (Quaestiones naturales), daß die Gegenstände durch ein kantiges Glas gesehen farbige Ränder zeigen, in denen die Regenbogenfarben (rot, gelb, grün, blau, violett) in der gewöhnlichen Reihenfolge aufeinander folgen. Seneca nannte diese Farben „unechte" im Gegensatz zu den wirklichen Regenbogenfarben. Später erhielten sie den Namen „apparente", d. h. scheinbare Farben, jetzt

Digitized by Google

bezeichnet man sie auch als prismatische Farben, weil sie in der Regel durch ein Glasprisma erzeugt werden.

Erst in der Mitte des siebzehnten Jahrhunderts wurden diese prismatischen Farben von Marcus Marci (1595 bis 1667), Professor der Medizin in Prag, genauer untersucht. Der von ihm ausgeführte Versuch wird durch Fig. 352 veranschaulicht. Er ließ ein Bündel Sonnenstrahlen auf ein Glasprisma *P* fallen. Sie wurden in diesem gebrochen, und als sie aus dem Prisma ausgetreten waren und auf einen weißen Schirm *S* fielen, erzeugten sie hier ein farbiges Bild, welches bedeutend größer war, als Marci erwartet hatte. Die parallelen Lichtstrahlen wurden nämlich durch das Prisma nicht allein abgelenkt, sondern auch voneinander entfernt oder zerstreut, so daß sie auf dem Schirm einen farbigen Streifen *R V* bildeten.

Fig. 352.



Beobachtung von M. Marci.

Das Bild auf dem Schirm zeigte die Regenbogenfarben in der richtigen Reihenfolge. Oben, also der ursprünglichen Richtung des Strahlenbündels am nächsten, war das Bild rot, dann weiter nach unten gelb, grün, blau und am unteren Ende, also von der ursprünglichen Strahlenrichtung am weitesten entfernt, violett. Marci spricht sich in seiner Schrift aus dem Jahre 1648 sehr klar über diesen Gegenstand aus, indem er sagt, daß das Licht, welches ungleich stark gebrochen wird, verschiedene Farben zeigt. Das Licht, welches am wenigsten gebrochen wird, ist rot, das, welches am meisten gebrochen wird, ist violett. Demselben Beobachter verdanken wir noch eine andere sehr wichtige Beobachtung. Er schreibt nämlich, daß das Licht, welches einmal gebrochen worden ist, bei einer wiederholten Brechung seine Farbe beibehält. Marci erklärte die Entstehung der Farben durch die unrichtige Annahme, daß die ungleich starke Brechung eine verschiedene Kondensation (Verdichtung) des Lichtes bewirke.

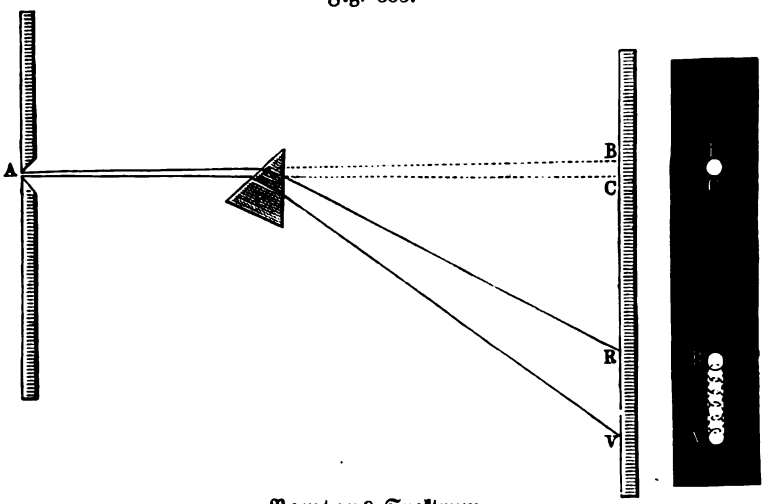
§ 380. Sehr eingehend beschäftigte man sich mit den „apparenten" Farben im siebzehnten Jahrhundert. Sie machten sich nämlich bei dem neu entdeckten Fernrohr in unangenehmer Weise bemerkbar, indem die Gegenstände von farbigen Rändern umgeben erschienen. Verschiedene Gelehrte, wie Descartes und Robert Hooke, versuchten die Entstehung dieser Farben zu erklären, was ihnen jedoch nicht gelang. Es war Newton vorbehalten, diese Erscheinung zu erklären. Er begann 1666 eine Reihe von Untersuchungen, die zu einer einfachen Erklärung der Natur der Farben führten.

Er führte seine Versuche in einem dunkeln Zimmer aus. Er ließ durch ein Loch *A* (Fig. 353) im Fensterladen, welches einen Durchmesser von

Digitized by Google

¼ Zoll hatte, ein Bündel Sonnenstrahlen in den dunkeln Raum eintreten. Auf der gegenüberstehenden Wand, in einer Entfernung von 22 Zoll, entstand ein weißes Sonnenbild *B C*. Dann stellte er das Prisma *P* in den Weg der Lichtstrahlen. Die Strahlen wurden, wenn die brechende Kante die obere war, nach unten abgelenkt, und es entstand ein farbiger Streifen, der ebenso breit wie das ursprüngliche Sonnenbild, aber fünfmal so lang wie dieses war. In diesem verlängerten Bilde, welches er Spektrum nannte,

Fig. 353.



Newtons Spektrum.

fand er ebenso wie Marci die Regenbogenfarben rot, gelb, grün, blau und violett mit allen Übergängen zwischen den einzelnen Hauptfarben. — Zunächst überzeugte er sich, daß der Ursprung der Farben nicht in dem Umstande zu suchen ist, daß einige Strahlen einen längeren, andere einen kürzeren Weg im Prisma zurückgelegt haben, eine Vermutung, die früher von Kepler ausgesprochen worden war. Newton brachte das Prisma in verschiedene Stellungen und gab dem Loch *A* verschiedene Formen, ohne jedoch eine Veränderung in den Farben des Spektrums zu beobachten.

Newton suchte sodann festzustellen, ob die Farben vielleicht durch Unregelmäßigkeiten im Glase hervorgebracht sein könnten, und er versuchte, das Spektrum zu stören, indem er die durch das Prisma zerstreuten Strahlen durch ein Prisma in umgekehrter Stellung hindurchgehen ließ (Fig. 354). Zu seiner Überraschung bemerkte er, daß nun an der Wand ein weißes, rundes Sonnenbild entstand. Dieser Versuch zeigte, daß das Prisma keineswegs den Gang der Strahlen störte, sondern in gesetzmäßiger Weise auf denselben einwirkte, indem eine zweite Brechung (in entgegengesetzter Richtung) den ursprünglichen Zustand, d. h. das weiße Licht, wiederherstellen kann. Aus dem Umstande, daß das Licht, welches nach der ersten Brechung farbig ist, nach der zweiten Brechung wieder als weißes Licht wirkt, zog ferner Newton den

Digitized by Google

wichtigen Schluß, daß das ursprüngliche weiße Licht bereits vor dem Eintreten in das erste Prisma eine Mischung farbiger Strahlen ist, die dadurch zerstreut werden, daß sie in verschiedenem Grade abgelenkt werden. Wenn sie dann in dem zweiten Prisma (Fig. 354) ebenso stark nach der entgegengesetzten Richtung gebrochen werden, so kommen die verschiedenen Farben wieder zusammen und erzeugen von neuem weißes Licht.

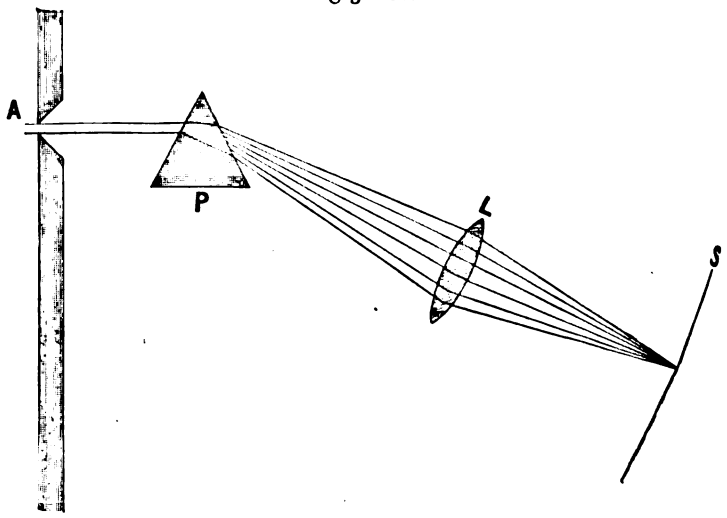
Fig. 354.

Entgegengesetzte Wirkung zweier Prismen.

Newton stellte verschiedene Versuche an, durch welche diese Verhältnisse näher aufgeklärt wurden. Er ließ z. B. das durch ein Prisma zerstreute Licht auf eine Sammellinse fallen (Fig. 355). Die farbigen Strahlen wurden durch die Linse vereinigt und auf einem Schirm entstand ein weißer (farbloser) Lichtfleck.

Auf diese Weise erkannte Newton, daß das weiße Sonnenlicht Strahlen von allen Farben enthält und daß jeder dieser Strahlen

Fig. 355.



Vereinigung der farbigen Strahlen zu weißem Licht.

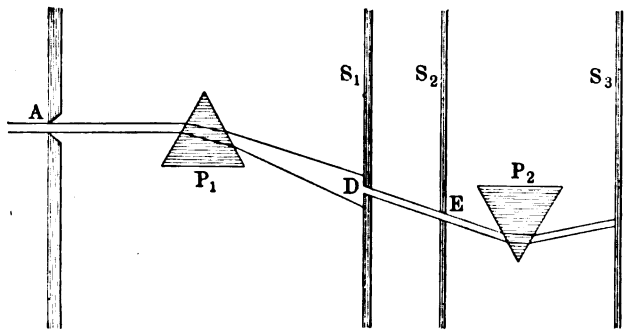
seinen bestimmten Brechungsexponenten besitzt. Die roten Strahlen werden am schwächsten, die violetten am stärksten gebrochen. Geht dagegen weißes Sonnenlicht durch ein Prisma, so werden die Farben voneinander geschieden, und es entsteht das Spektrum, wenn man das gebrochene Licht auf einen Schirm fallen läßt. Das weiße Licht ist also eine Mischung von allen möglichen Farben. — Dies läßt sich sehr schön in folgender Weise zeigen. Durch *A* (Fig. 353) kommt ein Lichtstrahl nach dem Prisma *P*, welches die Strahlen so zerstreut, daß das Spektrum *RV* entsteht. Läßt man

Digitized by Google

das Prisma um eine Achse schwingen, die zur brechenden Kante parallel ist, so bewegt sich das Spektrum an der Wand auf und ab, und wenn das Prisma sehr schnell schwingt, so wird ein Punkt des Schirmes sehr schnell nacheinander mit allen Farben beleuchtet. Richtet man nun seine Aufmerksamkeit auf diesen Punkt, so kommt von ihm in schneller Reihenfolge Licht von allen Farben in das Auge, und diese Farbeneindrücke wechseln so schnell, daß sich der eine noch nicht verloren hat, wenn sich der andere geltend macht — der Lichteindruck auf den Sehnerven hält nämlich einige Zeit an (vergl. § 111) — und alle die verschiedenen Farbeneindrücke verschmelzen zu einem einzigen, nämlich zur Wahrnehmung von weißem Licht.

§ 381. Es war sehr wichtig, sich davon zu überzeugen, daß die Lichtstrahlen von verschiedener Farbe ungleich stark gebrochen werden. Newton bewies dies durch den folgenden Versuch. Durch das Prisma P_1 (Fig. 356) wurde das weiße Sonnenlicht zerstreut, so daß auf dem Schirm S_1 ein

Fig. 356.



„Experimentum crucis.“

Spektrum entstand. Durch eine feine Öffnung D in dem Schirm konnte ein einzelner farbiger Strahl bis zum Schirm S_2 weitergehen, der ebenso wie der erste mit einer Öffnung E versehen war. Der Lichtstrahl ging durch die Öffnung und fiel dann auf das Prisma P_2. Nachdem er durch dieses Prisma hindurchgegangen war, fiel er auf den dritten Schirm S_3. Der Lichtstrahl, welcher das Prisma P_2 trifft, hat unter allen Umständen die Richtung DE. — Nun konnte Newton durch Drehung des ersten Prismas P_1 jeden beliebigen farbigen Strahl einzeln auf die Öffnung D und das Prisma P_2 fallen lassen, und er beobachtete, daß der Lichtfleck auf dem hintersten Schirm am weitesten oben war, wenn er violett war, dagegen am weitesten unten, wenn er rot war. Dies beweist, daß bei dem Durchgang durch das Prisma P_2 die roten Strahlen am schwächsten, die violetten dagegen am stärksten gebrochen werden.

Aus diesem Versuch ging zugleich hervor, daß einfarbiges (monochromatisches) Licht bei der Brechung nicht in neue Farben zerlegt wird. Das

Digitized by Google

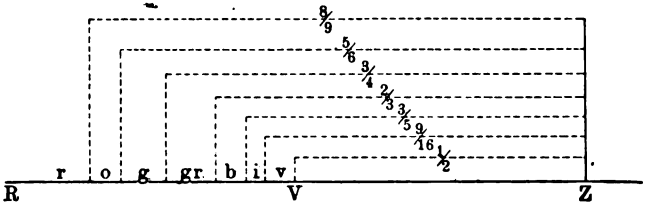
schmale Lichtbündel DE wurde durch das Prisma nicht zerstreut, sondern die Strahlen waren nach dem Austritt parallel.

Newton legte diesem Versuch mit seinen beiden Resultaten eine große Bedeutung bei und nannte ihn das experimentum crucis. Durch das Wort Kreuz (crux) soll der Wegweiser an einem Kreuzweg angedeutet sein. Newton wollte durch diese Bezeichnung die Ansicht zum Ausdruck bringen, daß durch den Versuch der richtige Weg für das Verständnis der Entstehung der prismatischen Farben angezeigt werde.

§ 382. Jeder farbige Strahl bildet sein besonderes Sonnenbild, und zwei unmittelbar nebeneinanderliegende farbige Strahlen bilden Sonnenbilder, die im Spektrum ungefähr an derselben Stelle liegen und daher zum Teil aufeinanderfallen. In einem solchen Spektrum sind also die Farben nicht rein.

Wie findet man sich nun im Spektrum zurecht? Das Auge ist nämlich nicht imstande, geringe Farbenunterschiede zu bemerken. Newton schlug vor,

Fig. 357.



Newtons Einteilung des Spektrums.

im Spektrum sieben Hauptfarben zu unterscheiden, Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett. Die Grenzen zwischen den einzelnen Farben bestimmte er in folgender Weise. Wenn die Länge des Spektrums RV (Fig. 357) ist, so wird VZ ebenso lang wie RV gemacht und die Länge RZ wird gleich 1 gesetzt. Die Entfernung von Z bis Violett ist also $^1/_2$. Nun setzte Newton die Entfernung bis Indigo gleich $^9/_{16}$, bis Blau gleich $^3/_5$, bis Grün, Gelb, Orange und Rot bezw. gleich $^2/_3$, $^3/_4$, $^5/_6$ und $^8/_9$, bis zum Ende vom Rot also gleich 1. Diese Zahlen geben, wie man leicht erkennt, die Länge der Saiten an, deren Töne eine Molltonleiter bilden:

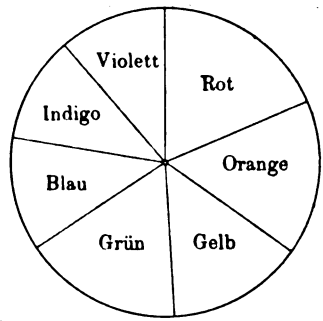
$$^1/_2 : {}^9/_{16} : {}^3/_5 : {}^2/_3 : {}^3/_4 : {}^5/_6 : {}^8/_9 : 1.$$

Dies gab Veranlassung, daß man von den sieben „optischen" Tönen sprach, und ein gewisser P. Castelli hat sogar den Plan für ein optisches Musikinstrument ausgearbeitet, ein optisches Klavier, welches durch Farben auf das Auge einen ähnlichen angenehmen Eindruck hervorbringen sollte wie die Töne auf das Ohr. Ein solcher Plan beruht jedoch auf einem Mißverständnis von Newtons Einteilung, die ja ganz willkürlich ist. Diese Einteilung sollte ein Mittel bieten, bestimmte Punkte im Spektrum festzuhalten. Dies erreichen wir heute mit Hilfe der Brechungsexponenten für die Strahlen von verschiedener Farbe (vergl. § 391).

Digitized by Google

Newton benutzte diese Einteilung auch, um zu bestimmen, in welchem Verhältnis die Farben gemischt werden müssen, um zusammen weißes Licht zu geben. Ein derartiger Versuch kann in folgender Weise ausgeführt werden. Eine kreisförmige Scheibe wird in sieben Ausschnitte geteilt, deren Größen der Ausdehnung der sieben Hauptfarben des Spektrums entsprechen, und die Ausschnitte werden mit den entsprechenden Farben bemalt. Wird nun die Scheibe in schnelle Drehung versetzt, so bekommt das Auge den Eindruck sämtlicher Farben aus derselben Richtung, und da die Eindrücke von den einzelnen Ausschnitten sozusagen gleichzeitig auf den Sehnerven wirken, so erscheint die Scheibe weiß. Da die prismatischen Farben jedoch nicht genau durch gemalte Farben ersetzt werden können, so ist das Weiß allerdings nicht ganz rein.

Fig. 358.



Farbenscheibe.

§ 383. Warum die Gegenstände durch ein Prisma betrachtet farbige Ränder zeigen, ist leicht zu erklären. Newton ließ Licht von einem Spalt auf ein Prisma und das von diesem erzeugte Spektrum auf einen Schirm fallen. Die Breite des Spaltes war ungefähr ebenso groß wie die Breite des Prismas. Das Bild war in der Mitte weiß, hatte aber an dem einen Ende einen roten, am anderen Ende einen violetten Rand. Newton gab auch die richtige Erklärung für diese Erscheinung. Das Prisma bildet nämlich eine ganze Anzahl farbiger Bilder des Spaltes, die aber in der Mitte zusammenfallen und daher weißes Licht erzeugen. Jede Lichtlinie, in die man sich den Spalt zerlegt denken kann, erzeugt nämlich auf dem Schirm ein Spektrum, von denen jedes folgende etwas tiefer (oder höher, je nach der Stellung des Prismas) liegt als das vorhergehende. In der Mitte des Bildes kommen daher alle Farben zusammen und erzeugen weißes Licht, während an dem einen Rande ein rotes und am anderen Rande ein violettes Bild des Spaltes übrigbleibt, dessen Farbe nicht durch die übrigen Farben zu Weiß ergänzt wird.

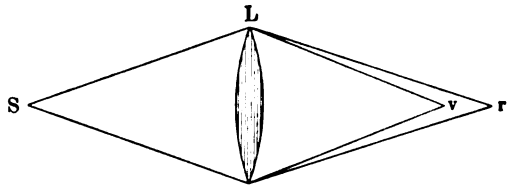
Newton erkannte ferner, daß das Licht auch beim Durchgang durch Linsen nicht nur eine Brechung, sondern zugleich eine Zerstreuung erleidet und daß hierdurch die Bilder im Fernrohr undeutlich werden. Man hatte früher durch Rechnung gefunden, daß eine Linse nicht von Kugelflächen begrenzt sein darf, wenn sie scharfe Bilder geben soll. Aber selbst Linsen, welche den Ergebnissen dieser Rechnungen entsprechend geschliffen waren, gaben unklare Bilder mit verschwommenen Farben. Die Rechnung galt nämlich nur für Strahlen mit einem bestimmten Brechungsverhältnis. Diese Linsen würden also ein einzelnes und klares Bild gegeben haben, wenn der Gegenstand nur eine Art von farbigen Strahlen ausgesandt hätte. Wenn der Gegenstand weißes Licht ausstrahlt, so erzeugt die Linse mehrere Bilder. Ist z. B. S

Digitized by Google

der Punkt, der weißes Licht nach der Linse L (Fig. 359) sendet, so ist der Bildpunkt nicht derselbe für die Strahlen von verschiedener Farbe. Die violetten Strahlen, welche am stärksten gebrochen werden, sammeln sich im Punkt v, die roten, die am schwächsten gebrochen werden, in r. Als Bild von S entsteht also eine farbige Linie vr. Die Linse kann daher kein scharfes Bild des Punktes S bilden, weil die Strahlen, welche von einem Punkt ausgehen, nicht wieder in einem Punkt zusammenkommen.

Newton war der Ansicht, daß die Brechung und die Zerstreuung des Lichtes untrennbar miteinander verbunden seien und das Verhältnis zwischen der Größe der Brechung und der Größe der Zerstreuung immer dasselbe sei, einerlei, welches die brechende Substanz sei. Hieraus zog er den Schluß, daß es unmöglich sei, die Zerstreuung aufzuheben, ohne zugleich auch die Brechung aufzuheben, daß es also unmöglich sei, mit Hilfe von Linsen klare Bilder zu erzeugen. Daher empfahl er die Anfertigung von Spiegelteleskopen (vergl. § 291). — Diese Ansicht Newtons hat sich jedoch später als irrtümlich erwiesen. Die Frage wurde erst im Jahre 1747 wieder aufgenommen, und zwar von Euler (II, § 230), der eine Abhandlung über die Verbesserung der Fernrohrobjektive schrieb. Die Richtigkeit von Newtons Versuchen, aus denen hervorging, daß ein Prisma zugleich mit der Zerstreuung auch die Brechung eines anderen Prismas aufhebt, konnte er allerdings nicht bestreiten (vergl. § 380). Aber er wies darauf hin, daß das Auge farbenfreie Bilder erzeugt und daß es daher auch möglich sein müsse, durch Zusammenstellung verschiedener Linsen farbenfreie (achromatische) Linsensysteme zu erhalten. Sieben Jahre später gelang es denn auch dem schwedischen Mathematiker Samuel Klingenstjerne (1698 bis 1765), theoretisch zu beweisen, daß die Behauptung Newtons, die Zerstreuung könne nur gleichzeitig mit der Brechung aufgehoben werden, falsch sei. Klingenstjerne kam vielmehr zu dem Resultat, daß, selbst wenn die Brechung aufgehoben wird, die Zerstreuung zum Teil erhalten bleibt. Er sandte seine Abhandlung dem Optiker John Dollond in London, der mit Versuchen über die Möglichkeit achromatischer Linsen beschäftigt war, zu denen er durch die Abhandlung Eulers angeregt worden war. Er ließ einen Lichtstrahl durch ein mit Wasser gefülltes Glasgefäß gehen, in dem ein Glasprisma stand. Das Licht ging durch zwei Wasserprismen und ein Glasprisma (Fig. 360). Dollond ordnete das Ganze so an, daß der Lichtstrahl in derselben Richtung aus dem Glasgefäß austrat, in der er eingetreten war, und er bemerkte, daß in diesem Falle das austretende Licht farbig war. Hier war also die Brechung auf-

Fig. 359.

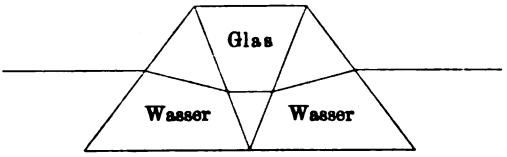


Wirkung einer einfachen Sammellinse.

Digitized by Google

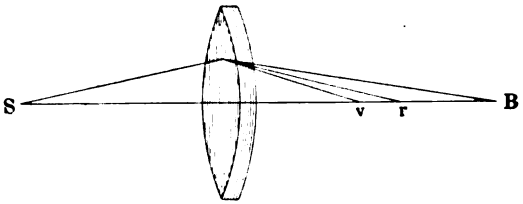
gehoben, aber nicht die Zerstreuung. Nun suchte Dollond die Zerstreuung aufzuheben, ohne daß die Brechung aufgehoben wurde, und dies erreichte er durch Zusammenstellung zweier Linsen, von denen die eine aus Kronglas, die andere aus Flintglas bestand. Von diesen beiden Glasarten zerstreut das Flintglas das Licht stärker als das Kronglas. Die zusammengesetzte Linse Dollonds bestand aus einer Sammellinse aus Kronglas und einer Zerstreuungslinse aus Flintglas. Die Sammellinse für sich allein würde einen Lichtpunkt als eine farbige Linie rv (Fig. 361) abbilden, wenn r den Sammelpunkt für die roten Strahlen und v den Sammelpunkt für die violetten Strahlen bezeichnet. Aber unmittelbar hinter der Sammellinse aus Kronglas befindet sich die Zerstreuungslinse aus Flintglas. Diese bricht die violetten Strahlen stärker als die roten, so daß beide Strahlen im Punkt B zusammenkommen. Die Doppellinse wirkt also als Sammellinse, aber die Farbenzerstreuung der einen Linse wird durch die andere Linse aufgehoben.

Fig. 360.



Dollonds Versuch.

Fig. 361.



Achromatische Linse.

Absolut farbenfrei sind derartige Doppellinsen allerdings nicht. Sie werden in der Praxis in der Regel so eingerichtet, daß nicht die äußersten roten und die äußersten violetten, sondern die gelbroten und die grünblauen Strahlen vereinigt werden.

§ 384. Durch diese sogenannten achromatischen Linsen gab Dollond den Anstoß zu einer neuen Entwickelung des Fernrohrs, dessen Bilder durch diese Linsen bedeutend verbessert wurden. Sie finden heute bei der Konstruktion von Fernröhren und Mikroskopen ausgedehnte Anwendung.

Dollond war französischer Herkunft und im Jahre 1706 geboren. Seine Eltern waren infolge der Aufhebung des Edikts von Nantes nach England ausgewandert. Der junge Dollond verlor früh seine Eltern und erlernte die Seidenweberei, beschäftigte sich aber in seinen Mußestunden sozusagen mit allen Wissenschaften, namentlich mit Optik und Astronomie. Er gab seinen Sohn Peter zu einem Optiker in die Lehre und begründete mit ihm zusammen im Jahre 1752 eine optische Werkstatt. Er trat jetzt mit der Royal Society in Verbindung und wurde selbst Mitglied derselben, sowie Königlicher Optiker. Er starb 1761.

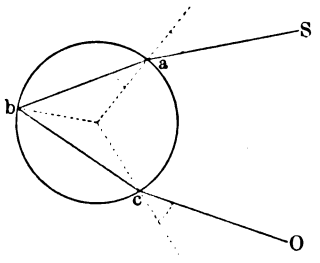
Digitized by Google

§ 385. Newtons Erklärung der Entstehung der Farben ermöglichte auch eine vollständigere Erklärung des Regenbogens. Aristoteles (§ 378) hatte den Regenbogen für ein mit „Dunkelheit" gemischtes Sonnenbild in den Wolken erklärt. Er wußte auch, an welcher Stelle in Bezug auf die Sonne der Regenbogen entsteht. Er liegt immer der Sonne gegenüber, und sein Mittelpunkt liegt in der Verlängerung einer Linie, die die Sonne mit dem Auge des Beobachters verbindet. Da nun der Radius des Regenbogens immer derselbe ist, so kann überhaupt kein Regenbogen entstehen, wenn die Sonne sehr hoch am Himmel steht. Je tiefer die Sonne am Himmel steht, desto mehr erhebt sich der Regenbogen über den Horizont.

Aristoteles wußte auch, daß außer dem Hauptregenbogen noch ein Nebenregenbogen entsteht, der dem ersteren parallel läuft und in dem die Farben in umgekehrter Reihenfolge aufeinander folgen. Im Hauptregenbogen ist der äußere Rand rot, der innere violett, im Nebenregenbogen dagegen der äußere Rand violett und der innere rot. Auch Seneca, der den Ansichten des Aristoteles vielfach beipflichtet, bezeichnet den Regenbogen als das Spiegelbild der Sonne. Daß dieses Bild so vielfach größer sei als die Sonne, hat nach seiner Meinung seinen Grund darin, daß im Wasser alles vergrößert wird.

§ 386. Diese Erklärungen geben jedoch keine wirkliche Einsicht in die Entstehung des Regenbogens. Dieser entsteht nicht nur dadurch, daß das Licht von den Regentropfen zurückgeworfen wird, sondern zugleich auch dadurch, daß es in den durchsichtigen Tropfen gebrochen wird. Dies ist zuerst von Vitello, einem Zeitgenossen R. Bacons, ausgesprochen und später von einem sächsischen Mönch Theodorich (Theodoricus de Saxonia) in einem 1311 abgefaßten, aber erst 1814 von Venturi herausgegebenen Werke (Comentari sopra la storia e la teoria dell' ottica) weiter ausgeführt worden. Die Ideen Theodorichs haben also auf die spätere Entwickelung der Regenbogentheorie keinen Einfluß ausgeübt, verdienen aber nichtsdestoweniger erwähnt zu werden.

Fig. 362.



Weg eines Lichtstrahls durch einen Wassertropfen.

Er beschreibt genau und richtig den Gang eines Lichtstrahls in einem Wassertropfen. Wenn der Lichtstrahl in der Richtung *Sa* (Fig. 362) ankommt, so tritt er in der Richtung *ab* in den Tropfen ein, wird im Punkt *b* zurückgeworfen (totale Reflexion, § 107) und tritt in der Richtung *cO* aus. Ein in der Richtung *cO* befindliches Auge erhält also Licht, welches zweimal gebrochen und einmal reflektiert worden ist.

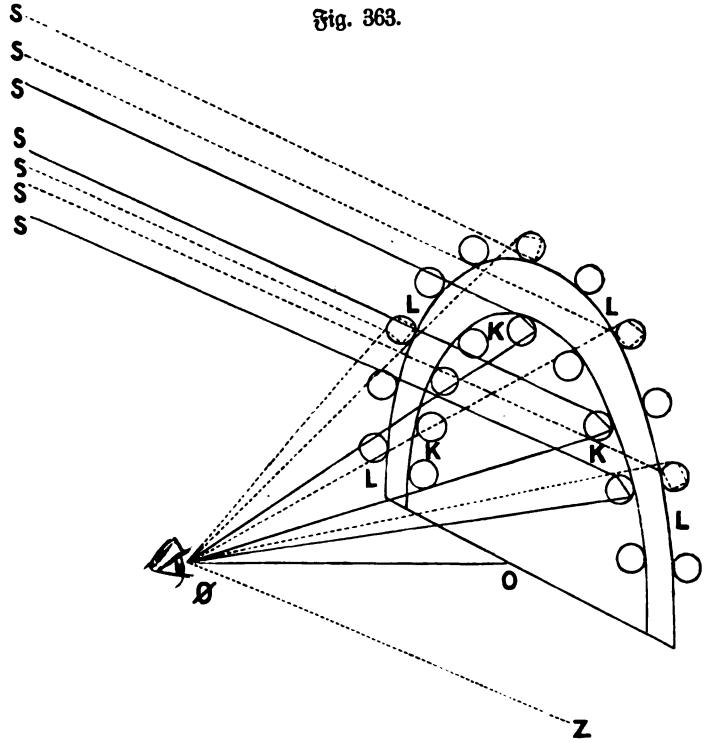
Das Auge *O* (Fig. 363) kann dieses zweimal gebrochene und einmal reflektierte Licht von allen Tropfen erhalten, die in dem Kreis *KK* liegen, dessen Mittelpunkt in der Linie von der Sonne nach *O* liegt. Alle diese

Digitized by Google

Tropfen befinden sich nämlich in derselben Stellung mit Rücksicht auf die einfallenden Sonnenstrahlen SSS und das Auge O. Sendet einer der Tropfen Licht in das Auge O, so müssen sie es alle tun, und der Bogen, den die Tropfen bilden, erscheint daher leuchtend. Dies ist, sagt Theodorich, der Hauptregenbogen.

Das Auge erhält aber auch Licht von einer Reihe von Wassertropfen (LL), die in einem Kreise außerhalb des Hauptregenbogens liegen. Ein

Fig. 363.



Hauptregenbogen und Nebenregenbogen.

Sonnenstrahl trifft jeden dieser Tropfen in A (Fig. 364, a. f. S.), wird nach B hin gebrochen, von hier nach C und von C nach D hin reflektiert, wo er in der Richtung DO austritt.

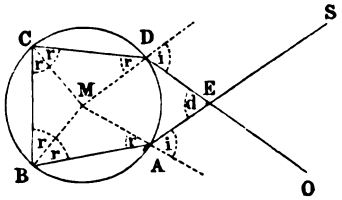
Das Licht von den Tropfen LL (Fig. 363) ist etwas schwächer als das Licht von den Tropfen KK, weil es zweimal reflektiert wird und weil bei jeder Reflexion etwas Licht verloren geht, d. h. in die Luft übertritt. Infolgedessen ist der Bogen LL nicht so hell wie der Bogen KK. Daher wird er als Nebenregenbogen bezeichnet.

Theodorich hat hiermit den Regenbogen im wesentlichen richtig erklärt. Die Größe des Bogens und die Entstehung der Farben konnte er dagegen nicht erklären, weil er das Brechungsgesetz nicht kannte (vergl. § 106).

Digitized by Google

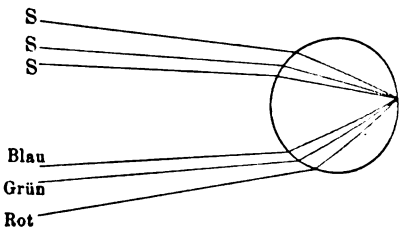
§ 387. Die Entstehung der Regenbogenfarben erklärte Antonius de Dominis (1566 bis 1624) durch einen schönen Versuch. Er füllte eine hohle Glaskugel mit Wasser und ließ das Sonnenlicht auf die Kugel fallen. Ein Teil des Lichtes ging durch die Kugel hindurch, ein anderer Teil wurde zurückgeworfen (Fig. 365), und es zeigte sich, daß sowohl das durchgehende

Fig. 364.



Weg eines Lichtstrahls durch einen Wassertropfen.

Fig. 365.



Beobachtung von Descartes.

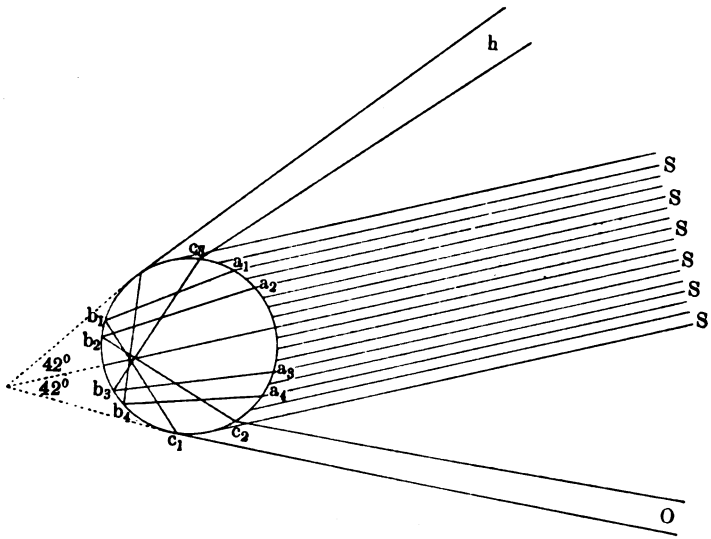
als auch das zurückgeworfene Licht farbig war. de Dominis erklärte die Entstehung der Farben durch die Annahme, daß der unterste Strahl mit weniger „Dunkelheit" gemischt werde, als die übrigen, weil er einen kürzeren Weg im Tropfen zurücklegt, als diese. Aus diesem Grunde sollte der unterste Strahl rot und der oberste violett sein, während die zwischenliegenden die übrigen Farben zeigen. Der Versuch wurde später von Descartes wiederholt, der mit dem Brechungsgesetz bekannt war. Er beobachtete, daß die Regenbogenfarben, die bei einer bestimmten Stellung der Kugel in der Reihenfolge Violett, Blau, Grün, Gelb, Rot erscheinen, verschwinden und dann in der entgegengesetzten Reihenfolge erscheinen, wenn man die Kugel in die Höhe hebt. Dies entspricht offenbar dem Hauptregenbogen und dem Nebenregenbogen. Descartes bemerkte, daß die mit Wasser gefüllte Kugel nur in ganz bestimmten Stellungen Licht nach dem Auge sandte, nämlich wenn eine Linie von der Kugel nach dem Auge einen ganz bestimmten Winkel mit der Linie vom Auge nach der Sonne bildete. Nun berechnete er, in welchen Richtungen die Sonnenstrahlen, die parallel auf einen Wassertropfen fallen, diesen verlassen, nachdem sie beim Eintritt und beim Austritt eine Brechung und im Inneren des Tropfens eine Reflexion erlitten haben. Es seien *S*, *S*, *S* . . (Fig. 366) die parallel einfallenden Sonnenstrahlen. Sie werden zum Teil von der Oberfläche des Tropfens zurückgeworfen, zum Teil treten sie in den Tropfen ein und schlagen entweder den durch Fig. 362 oder den durch Fig. 364 veranschaulichten Weg ein. Descartes fand durch seine Rechnung, daß die Strahlen, welche im Inneren des Tropfens einmal reflektiert werden (Fig. 362), selbstverständlich in verschiedenen Richtungen, vorzugsweise aber in einer bestimmten Richtung *cO* (Fig. 366) austreten, die mit den einfallenden Sonnenstrahlen einen Winkel von 42° bildet. Nur aus dieser Richtung erhält das Auge einen starken Lichteindruck von dem Tropfen. Daher sieht das Auge im Punkt *O* alle diejenigen Tropfen stark

Digitized by Google

leuchten, die auf einem Kreis um den Punkt liegen, in welchem die Linie von der Sonne nach dem Auge die Himmelskugel trifft, und die von diesem Punkte 42° entfernt sind.

Ein Strahl kann aber auch den Tropfen auf dem durch Fig. 364 veranschaulichten Wege durchlaufen, indem er im Inneren des Tropfens zweimal reflektiert wird. Descartes fand, daß für diese Strahlen etwas ähnliches gilt wie für die einmal reflektierten Strahlen. Sie treten vorzugsweise in

Fig. 366.



Descartes Berechnung des Regenbogens.

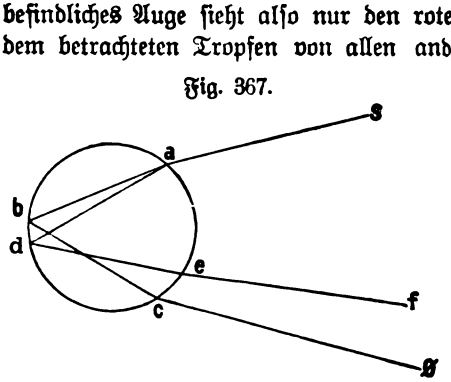
einer Richtung aus, die mit der Linie nach der Sonne einen Winkel von 52° bildet. Ein Auge im Punkt O erhält also starkes Licht von den Tropfen auf dem Kreise KK (Fig. 363), dessen Punkte 42° von dem Punkt entfernt sind, in dem die Verbindungslinie der Sonne mit dem Auge die Himmelskugel trifft, und von den Tropfen auf dem Kreise LL, dessen Punkte 52° von jenem Punkte entfernt sind. Von LL (Hauptregenbogen) kommt stärkeres Licht, weil hier nur eine Reflexion stattfindet. Das von KK kommende Licht ist bedeutend schwächer und die Farben folgen in Übereinstimmung mit dem Versuch von Descartes in umgekehrter Reihenfolge.

§ 388. Descartes gab also durch seine Rechnung die Erklärung, weshalb der Regenbogen stets mit demselben Radius (ausgedrückt in Bogenmaß) erscheint, ebenso weshalb der Abstand des Nebenregenbogens vom Hauptregenbogen ungefähr 10° beträgt. Die Entstehung der Farben dagegen vermochte er nicht zu erklären, da dies ohne die Newtonsche Farbentheorie nicht möglich ist. Betrachtet man den Gang eines Lichtstrahls in den Tropfen, die den Hauptregenbogen erzeugen, so findet man, daß der Strahl bei seinem Eintritt in den Tropfen (bei a, Fig. 367, a. f. S.) so zerstreut wird, daß ab den

Digitized by Google

äußersten roten und ad den äußersten violetten Strahl bezeichnet. Nachdem die Strahlen bei b und d reflektiert worden sind, verläßt der erstere den Tropfen in der Richtung cO, der letztere in der Richtung cf. Ein bei O befindliches Auge sieht also nur den roten Strahl, und zwar ebenso wie von dem betrachteten Tropfen von allen anderen, die sich in derselben Stellung befinden. Dasselbe Auge erhält gelbes Licht von Tropfen, die unmittelbar neben denjenigen Tropfen schweben, von denen das rote Licht kommt, und zwar innerhalb des Kreises, den diese Tropfen bilden. Weiter nach innen folgen weitere Kreise von Tropfen, von denen grünes, blaues und violettes Licht in das Auge kommt.

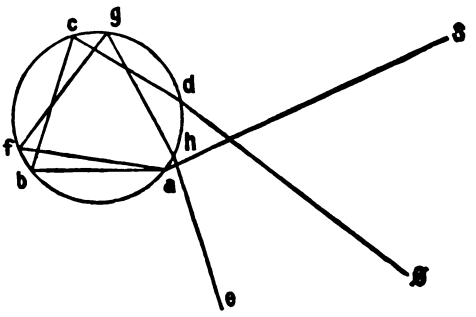
Fig. 367.



Farben im Hauptregenbogen.

Im Nebenregenbogen folgen, infolge der zweimaligen Reflexion, die Farben in umgekehrter Reihenfolge aufeinander. Der Gang eines Lichtstrahls wird durch Fig. 368 veranschaulicht. Er tritt bei a ein und wird beim Eintritt zerstreut. Der rote Strahl nimmt den Weg $abcdO$, der violette den Weg $afghe$. Hier bildet also der violette Strahl einen größeren Winkel mit der Richtung der Sonnenstrahlen als der violette. Der Nebenregenbogen hat daher außen den violetten und innen den roten Rand.

Fig. 368.



Farben im Nebenregenbogen.

Der Zwischenraum zwischen dem Hauptregenbogen und dem Nebenregenbogen ist weniger hell als die Räume innerhalb des Hauptregenbogens und außerhalb des Nebenregenbogens, denn die beiden Bogen bilden ja die Grenzen für die zurückgeworfenen Lichtstrahlen.

Außer dem Hauptregenbogen und dem um 10° größeren Nebenregenbogen können noch verschiedene andere Regenbogen entstehen, indem die Sonnenstrahlen in den Wassertropfen mehr als zweimal zurückgeworfen werden können. Diese Nebenregenbogen sind aber äußerst lichtschwach und daher selten zu sehen. Am besten kann man sie beobachten, wenn man starkes Sonnenlicht vermittelst eines Spiegels auf die fallenden Tropfen eines Springbrunnens fallen läßt. Auf diese Weise hat der französische Physiker Billet nicht weniger als 19 verschiedene Regenbogen beobachtet.

Es muß übrigens bemerkt werden, daß sich an den Regenbogen noch

Digitized by Google

andere optische Erscheinungen knüpfen, z. B. die Bildung von farbigen Streifen innerhalb des Hauptregenbogens und außerhalb des ersten Nebenregenbogens. Die Erklärung dieser Erscheinungen erfordert umständliche Rechnungen, auf die wir uns nicht einlassen können. Auch ist zum Verständnis derselben die Kenntnis anderer optischer Erscheinungen erforderlich, die erst im Folgenden Erwähnung finden werden.

§ 389. Das weiße Sonnenlicht enthält, wie wir gesehen haben, verschiedenartige Strahlen, nämlich Strahlen, die verschieden stark gebrochen werden. Die am wenigsten brechbaren Strahlen haben wir als „rote", die am stärksten brechbaren als „violette" bezeichnet. Zwischen den roten und den violetten liegen die gelben, grünen und blauen Strahlen. Dies bedeutet jedoch nicht, daß diese Lichtstrahlen an und für sich farbig sind. Alle Lichtstrahlen sind an und für sich unsichtbar. Wir *sehen* einen Lichtstrahl nicht, der an uns vorbeigeht. Man kann allerdings einen Lichtstreifen sehen, der z. B. durch das Schlüsselloch in ein dunkles Zimmer kommt, aber nur dadurch, daß das Licht von Staubteilchen, die in der Luft schweben, in das Auge reflektiert wird. Ein solcher Lichteindruck kann mehr oder weniger stark sein, und das Auge vermag, wenn auch nur in geringem Grade, zwischen schwächerem und stärkerem Licht zu unterscheiden. Aber die Art des Lichteindruckes hängt von dem Grade der Brechbarkeit des Lichtes ab. Wird der Eindruck von einem Gemisch aller Grade der Brechbarkeit hervorgerufen, und sind die einzelnen Bestandteile des Gemisches in demselben Verhältnis wie im Sonnenlicht gegenwärtig, so bekommt das Auge einen Lichteindruck, den die Nerven in einer bestimmten Weise zum Bewußtsein bringen. Wird der Lichteindruck dagegen nur durch Strahlen von *einem* Grade der Brechbarkeit hervorgerufen, so wird derselbe in einer anderen Weise empfunden. Diese verschiedenen Arten der Lichtempfindung bezeichnen wir als die Empfindung der verschiedenen Farben. Die am wenigsten brechbaren Strahlen geben die Empfindung von Rot, die etwas stärker brechbaren die Empfindung von Gelb, u. s. w.

Wenn das von einem Gegenstande ausgehende Licht dieselbe Farbenempfindung hervorbringt wie das Sonnenlicht, so nennen wir den Gegenstand weiß. Ein Gegenstand, der „rote" Strahlen nach dem Auge sendet, heißt rot, u. s. w. Die Farbe der Gegenstände hängt also von der Brechbarkeit des Lichtes ab, welches von ihnen in das Auge kommt. Daß die Blätter aller Bäume grün sind, bedeutet also, daß sie die grünen Strahlen des Sonnenlichtes zurückwerfen, während sie die übrigen Strahlen mehr oder weniger einsaugen.

Viele Stoffe, wie farbloses Glas, lassen die verschiedenen Lichtstrahlen in gleichem Grade durch. Das weiße Licht erleidet daher beim Durchgang durch einen derartigen Stoff keine Veränderung. Andere (farbige) Glasarten lassen dagegen nur Licht von einem bestimmten Grade der Brechbarkeit durch, „rotes" Glas nur rote Strahlen, „grünes" Glas nur grüne Strahlen, u. s. w. Dies ist jedoch nicht so zu verstehen, daß das durchgehende Licht im buch-

Digitized by Google

stäblichen Sinne einfarbig (monochromatisch) ist, daß also alle Strahlen desselben genau gleich stark gebrochen werden. Durch rotes Glas geht eine Gruppe von nahe beieinander liegenden roten Strahlen hindurch, die zusammen eine rote Mischfarbe bilden. Wir werden später sehen, daß das Absorptionsvermögen der Flüssigkeiten für gewisse Strahlen des Sonnenlichtes praktische Bedeutung gewonnen hat.

In den meisten Fällen zeigt ein Gegenstand dieselbe Farbe, einerlei ob in das Auge Licht eintritt, welches von dem Gegenstand zurückgeworfen oder durch denselben hindurchgegangen ist. Ein Stück rotes Glas erscheint sowohl im reflektierten als auch im durchgehenden Licht rot. Der Grund hiervon muß darin gesucht werden, daß das Licht nicht von der geometrischen Oberfläche des Glases zurückgeworfen wird, sondern daß die Lichtstrahlen etwas in das Glas eindringen und im Innern des Glases zurückgeworfen werden. Hat das Glas nun die Eigenschaft, daß es alle Strahlen mit Ausnahme der roten absorbiert, so wird das zurückgeworfene Licht, ebenso wie das durchgehende, rot sein. Erfolgt die Zurückwerfung des Lichtes wirklich an der Oberfläche des Glases, so muß natürlich weißes Licht als solches zurückgeworfen werden. Einzelne Stoffe zeigen aber ein ganz eigentümliches Verhalten. Läßt man z. B. einen Tropfen Fuchsinlösung auf einer Glasplatte eintrocknen, so erscheint der Fleck im durchgehenden Lichte rot, im reflektierten dagegen grün. Während also die grünen Strahlen von der Oberfläche reflektiert werden, werden sie beim Durchgang des Lichtes durch die Substanz absorbiert. Ein ähnliches Verhalten zeigen die farbigen Metalle. Gold wirft vorzugsweise rote und gelbe Strahlen zurück, aber ein dünnes, durchscheinendes Goldblättchen läßt grünes Licht durch.

§ 390. In der Regel zeigt ein Körper eine Farbe, die in dem Licht, von welchem er getroffen wird, enthalten ist. Wird z. B. ein Körper mit rotem Licht beleuchtet, so erscheint er mehr oder weniger stark rot gefärbt. Ein grünes Blatt zeigt in roten Strahlen nur ein äußerst schwaches Licht, aber es erscheint rot. Ein grünes Blatt erscheint durch ein rotes Glas betrachtet rot, und zwar deshalb, weil das grüne Blatt an seiner Oberfläche rote Strahlen zurückwirft. Es gibt aber auch Stoffe, die Licht von einer gewissen Brechbarkeit aufnehmen und Licht von anderer Brechbarkeit aussenden. Bereits im 16. Jahrhundert hatte ein spanischer Gelehrter die Beobachtung gemacht, die später von Athanasius Kircher und Robert Boyle genauer beschrieben wurde. Später kam diese interessante Erscheinung in Vergessenheit, und es war Goethe, der sich zuerst wieder mit ihr beschäftigte.

Athanasius Kircher hatte einen aus dem Holz des amerikanischen Nierenbaumes (Anacardium) gearbeiteten Becher verehrt bekommen. Kircher beobachtete, daß das Wasser, welches längere Zeit in diesem Becher gestanden hatte, zwar vollkommen klar war, aber einen eigentümlichen blauen Schimmer zeigte. Nicht das durch das Wasser hindurchgehende Licht wurde farbig, sondern das Wasser hatte die Eigenschaft angenommen, blaues Licht auszustrahlen. Boyle untersuchte ebenfalls diese Erscheinung und fand, daß

Digitized by Google

Wasser, welches mit dem Holz des Nierenbaumes in Berührung gewesen war, im durchgehenden Licht goldgelb, im reflektierten dagegen blau erschien.

Das Wasser nimmt diese merkwürdige optische Eigenschaft natürlich dadurch an, daß es von einem Bestandteil des betreffenden Holzes etwas auflöst. Goethe fand, daß die Rinde der Roßkastanie auf das Wasser eine ähnliche Wirkung ausübt. Wenn Licht auf die Lösung fällt, so sendet sie ein reines, blaues Licht aus. Sieht man dagegen durch die Lösung hindurch, so erscheinen die Gegenstände gelb. Im Jahre 1833 fand Brewster, daß eine Lösung des grünen Farbstoffes der Blätter (Chlorophyll) in Weingeist im Sonnenlicht mit dunkelroter Farbe leuchtet. Daß der Flußspat im Sonnenlicht blaues Licht aussendet, wurde ebenfalls von Brewster beobachtet. Seitdem hat man zahlreiche andere Substanzen kennen gelernt, die im Sonnenlicht selbstleuchtend werden. Eine der bekanntesten dieser Substanzen ist das Petroleum.

Der englische Physiker Stokes hat eine Reihe eingehender Untersuchungen ausgeführt, um das Wesen der Fluoreszenz (so nennt man die Erscheinung nach dem Flußspat, welcher das Element Fluor enthält) aufzuklären. Er ließ ein Sonnenspektrum auf ein Glasgefäß fallen, welches eine wasserhelle, fluoreszierende Lösung von Chininsulfat enthielt. Die roten, gelben, grünen und blauen Strahlen gingen ohne weiteres durch die Flüssigkeit hindurch, dagegen bewirkten die violetten Strahlen, daß die Flüssigkeit selbstleuchtend wurde, so daß sie einen bläulichen Schimmer aussandte. Auch die unsichtbaren Strahlen, welche jenseits des violetten Endes des Spektrums liegen, die sogenannten ultravioletten Strahlen, brachten die Flüssigkeit zum Leuchten. Nach Stokes besteht der Vorgang darin, daß die Flüssigkeit die violetten und die ultravioletten Strahlen absorbiert und dafür blaue Strahlen aussendet. Da nun die violetten und die ultravioletten Strahlen stärker gebrochen werden als die blauen, kann die Erklärung von Stokes auch so ausgesprochen werden, daß ein fluoreszierender Stoff gewisse Strahlen absorbiert und dafür andere, von geringerer Brechbarkeit aussendet.

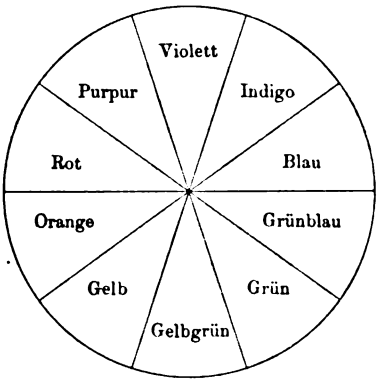
Man hat gefunden, daß das elektrische Bogenlicht viel mehr ultraviolette Strahlen enthält als das Sonnenlicht. Stokes erzeugte das Spektrum des elektrischen Lichtes vermittelst eines Bergkristallprismas, welches im Gegensatz zu einem Glasprisma die ultravioletten Strahlen durchläßt. Ließ er das Spektrum auf einen fluoreszierenden Stoff, z. B. auf ein mit einem Uransalz bestrichenes Papier fallen, so beobachtete er, daß das Spektrum sechs- bis siebenmal so lang war als das gewöhnliche sichtbare Spektrum. Man kann also vermittelst des Fluoreszenzphänomens das Vorhandensein der nichtleuchtenden ultravioletten Strahlen nachweisen.

§ 391. Betrachtet man das Sonnenspektrum, so sieht man eine zahllose Menge von Farben oder Farbenübergängen vom äußersten Rot bis zum äußersten Violett. Das Auge ist nicht imstande, die einzelnen Farben mit Sicherheit festzuhalten, aber wir können jeden einzelnen farbigen Strahl physikalisch vermittelst seines Brechungsexponenten definieren, vorausgesetzt, daß sich dieser

Digitized by Google

ganz genau messen läßt. Wir haben daher ein sicheres Kennzeichen der Farbe in der Größe der Brechung. Wenn es sich aber um die Wahrnehmung der Farben handelt, dann kann z. B. ein gelber Farbenton nicht nur durch die gelben Strahlen des Spektrums, sondern auch durch eine Mischung anderer Farben des Spektrums hervorgerufen werden. Rote und grüne Strahlen können durch Mischung alle zwischenliegenden Farben erzeugen. Grüne und violette Strahlen können zusammen eine blaue Farbe hervorbringen. Es gibt jedoch drei Farben, **Rot, Grün und Violett**, die sich nicht durch Mischung anderer Farben herstellen lassen und die daher **Grundfarben** genannt werden. Aus diesen können alle anderen Farben durch Mischung hergestellt werden, und da alle Farben zusammen Weiß geben, müssen auch die drei Grundfarben zusammen Weiß geben. Versuche über die Mischung der Farben werden mit der in Fig. 358 (auf S. 354) abgebildeten Scheibe ausgeführt (vergl. § 382).

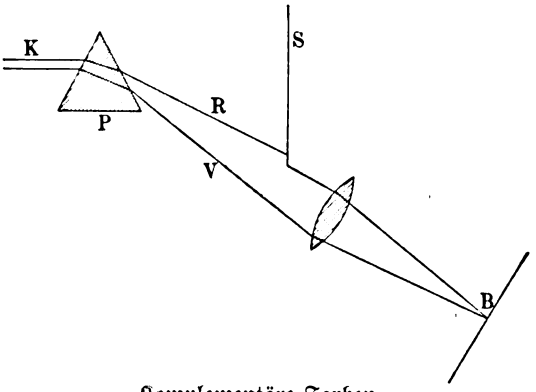
Fig. 369.



Komplementäre Farben.

Wird die Scheibe mit den drei Grundfarben Rot, Grün und Violett bemalt und in Drehung versetzt, so erscheint sie weiß, vorausgesetzt, daß die drei Farbensektoren zueinander im richtigen Verhältnis stehen. Werden die Sektoren dagegen abwechselnd grün und violett bemalt, so erscheint die rotierende Scheibe blaugrün. Wenn daher eine Scheibe, deren Sektoren abwechselnd rot und blaugrün bemalt sind, in Drehung versetzt wird, so muß sie weiß erscheinen. Die beiden Farben, welche zusammen Weiß erzeugen, nennt man komplementäre Farben oder Ergänzungsfarben, und jeder Farbe entspricht eine andere, durch die sie zu Weiß ergänzt wird. Schreibt man die Namen der Farben wie in Fig. 369 in die 10 Sektoren eines Kreises, so bezeichnen je zwei diametral gegenüberstehende Namen komplementäre Farben.

Fig. 370.



Komplementäre Farben.

Reine Ergänzungsfarben erhält man vermittelst des Spektrums. Läßt

man ein Strahlenbündel durch ein Prisma gehen und hält von den farbigen Strahlen die roten durch den Schirm *S* (Fig. 370) zurück, während man die übrigen durch eine Sammellinse gehen läßt, so vereinigen sie sich auf dem Schirm *B* zu einem blaugrünen Fleck. Wenn also aus dem Sonnenlicht die roten Strahlen ausgeschlossen werden, so bilden die übrigen zusammen die Ergänzungsfarbe von Rot.

§ 392. Der Farbensinn des Auges ist unzuverlässig. Weiß wird nicht immer als Weiß empfunden. Fixiert man eine Zeit lang eine rote Scheibe, die an einer weißen Wand befestigt ist, und richtet dann den Blick auf eine andere Stelle an der Wand, so sieht man noch längere Zeit das Bild der Scheibe, und zwar einige Augenblicke in seiner wirklichen, dann aber in der komplementären Farbe. Die Entstehung dieses sogen. Nachbildes hat seinen Grund vor allen Dingen darin, daß der Lichteindruck eine Zeit lang anhält, dann aber auch darin, daß der Sehnerv für die Wahrnehmung des einfarbigen Lichtes etwas ermüdet und daher für die komplementären Strahlen relativ empfindlicher wird. Wenn sich das Auge von der roten Scheibe abwendet, so empfindet es noch einige Augenblicke die rote Farbe, allein bald ist dieser Lichteindruck vorbei und nun sind es die komplementären grünen Strahlen von der weißen Wand, die das grüne Nachbild hervorrufen.

Wenn man verschiedene Farben nebeneinander sieht, so üben sie einen eigentümlichen Einfluß aufeinander aus. Es entstehen sogenannte Kontrastfarben, die man z. B. beobachtet, wenn man eine graue Scheibe auf farbigem Hintergrunde betrachtet. Legt man z. B. eine graue Oblate auf ein grünes Papier, so erscheint sie rötlich, während sie auf rotem Papier grünlich erscheint.

Wenn Farben so zusammengestellt werden sollen, daß sie harmonisch wirken, so muß jede Farbe als Nachbarfarbe ihre Kontrastfarbe haben, wenigstens wenn es sich nur um zwei Farben handelt. Wenn mehr als zwei Farben zusammengestellt werden, so liegen die Verhältnisse nicht so einfach, doch läßt sich keine bestimmte Regel angeben, die befolgt werden müßte.

§ 393. Newton übersandte seine Abhandlung über die Farben der Royal Society im Jahre 1672. Sieben Jahre früher war eine bemerkenswerte Abhandlung über das Licht erschienen, deren Verfasser der bereits 1663 gestorbene Jesuitenpater Francesco Grimaldi, Lehrer am Jesuitenkollegium zu Bologna, war. Die Abhandlung ist höchst wahrscheinlich deshalb erst nach dem Tode des Verfassers erschienen, weil dieser durch die Veröffentlichung Anstoß zu erregen fürchtete, da der Inhalt der Schrift mit allgemein als richtig anerkannten Ansichten im Widerspruch stand.

Grimaldi ließ durch eine feine Öffnung Licht in ein dunkles Zimmer eintreten, und in dem entstehenden Lichtkegel brachte er einen Stab an, dessen Schatten auf eine weiße Wand fiel. Zu seiner Überraschung bemerkte er, daß der Kernschatten des Stabes breiter war, als er nach dem Gesetz von der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes hätte sein sollen. Außerdem aber bemerkte er an beiden Seiten des Schattens farbige Streifen, ja bei näherer

Digitized by Google

Untersuchung beobachtete er im Schatten selbst ähnliche helle, farbige Streifen. — Grimaldi konnte die Entstehung dieser Streifen nicht anders erklären als durch die Annahme, daß das Licht nicht nur, wie man bis dahin angenommen hatte, in geraden Linien fortschreitet, sondern daß es beim Streifen eines schattenwerfenden Gegenstandes zum Teil in den Schatten hinein und zum Teil aus dem Schatten heraus gebeugt wird.

Um sich zu überzeugen, daß es nicht der Stab war, der den Lichtstrahlen durch Spiegelung oder Brechung eine andere Richtung gab, entfernte Grimaldi den Stab und setzte an seine Stelle eine undurchsichtige Platte mit einer kleinen runden Öffnung, die das Licht durchließ. Nun zeigte es sich, daß der runde Lichtfleck auf dem Schirm größer war, als er hätte sein müssen, wenn sich die Lichtstrahlen geradlinig fortgepflanzt hätten.

Grimaldi änderte sodann den Versuch in der Weise ab, daß das Licht durch zwei kleine Öffnungen eindrang, und so, daß die beiden Lichtflecke zum Teil aufeinander fielen. An derjenigen Stelle des Schirmes, auf die Licht von beiden Öffnungen fiel, war es heller als da, wo der Schirm nur von dem Licht einer der beiden Öffnungen getroffen wurde, aber in dem stärker beleuchteten Teil des Lichtfleckes waren dunkle (farbige) Ringe zu bemerken. Wurde die eine Öffnung geschlossen, so verschwanden sofort die dunkeln Ringe, wurde sie wieder geöffnet, so erschienen auch sofort wieder die dunkeln Ringe. Das Licht von der einen Öffnung brachte also Dunkelheit hervor, wenn es auf den von dem Licht der anderen Öffnung erzeugten Fleck fiel. Grimaldi hatte also durch diesen Versuch bewiesen, daß Licht zu Licht hinzugefügt Dunkelheit erzeugen kann.

§ 394. Was Grimaldi beobachtet hatte, waren Eigenschaften des Lichtes, die bis dahin ganz unbekannt gewesen waren. Daß das Licht um die Ecke gehen kann oder daß ein Lichtstrahl die Wirkung eines anderen je nach Umständen verstärken oder schwächen kann, hatte früher Niemand gewußt. Grimaldi konnte zwar die von ihm beobachteten Erscheinungen nicht in erschöpfender Weise erklären, aber er verglich die hellen und dunkeln Ringe, die um den Lichtfleck auf dem Schirm entstanden, mit den kreisförmigen Wellenbergen und Wellentälern, die entstehen, wenn man einen Stein ins Wasser wirft. Die Wellenberge entsprechen den hellen und die Wellentäler den dunkeln Ringen. Zum Schluß sagt er: „Und ebenso wie die Wellen um den Stein nichts anderes als aufgehäuftes Wasser ist, um welches auf jeder Seite eine Furche herumgeht, ebenso sind die leuchtenden Streifen nichts anderes als das Licht selbst, welches infolge einer gewaltsamen Zerstreuung ungleich verteilt und durch schattenerfüllte (lichtarme) Zwischenräume getrennt wird."

Die Vorstellungen Grimaldis waren zwar ziemlich unklar, aber er hat ohne Zweifel eine Ahnung davon gehabt, daß das Licht etwas ist, was mit den Wasserwellen verglichen werden kann. In demselben Jahre, in welchem seine Abhandlung gedruckt wurde, 1665, erschien Robert Hookes berühmtes Werk „Mikrographia", in welchem er das Licht für eine Art Wellenbewegung erklärte. Nach seiner Ansicht besteht das Licht aus schnellen, kleinen Schwin-

Digitized by Google

gungen, die von dem leuchtenden Körper ausgeführt werden. In einem gleichförmigen Körper schreiten diese Schwingungen (Wellen) nach allen Richtungen mit derselben Geschwindigkeit fort. Die Welle bildet daher eine stetig wachsende Kugelfläche, ähnlich wie die Wasserwelle einen stetig wachsenden kreisförmigen Ring bildet. Die Lichtwelle pflanzt sich aber viel schneller fort als eine Wasserwelle.

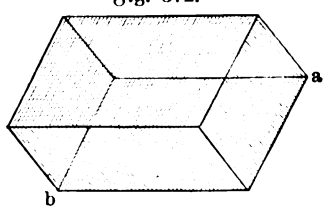
§ 395. In demselben Jahre, in welchem die Versuche Grimaldis und die Wellentheorie Hookes bekannt wurden, machte Rasmus Bartholin (1625 bis 1698) eine wichtige Entdeckung auf dem Gebiete der Optik. Bartholin gehörte einer einflußreichen Familie an, die gegen Ende des 17. Jahrhunderts die Kopenhagener Universität beherrschte. Er war Arzt und Mathematiker, beschäftigte sich aber auch mit astronomischen und physikalischen Arbeiten. Im Jahre 1664 schrieb er über Kometen und 1665 über die Luft in Kopenhagen. Seine Entdeckung in der Optik betraf die Brechung des Lichtes im durchsichtigen Kalkspat, dem sogenannten isländischen Doppelspat. Das Mineral ist wasserhell und kristallisiert in Rhomboedern (Fig. 372). Bartholin fand, daß ein Gegenstand doppelt erscheint, wenn er durch eine Kalkspatplatte betrachtet wird. Das Licht kommt also von einem Punkte her auf zwei verschiedenen Wegen ins Auge. Der Kalkspat spaltet den Lichtstrahl in zwei Strahlen, von denen jeder seinen besonderen Weg geht. Man sieht dies sehr deutlich, wenn man eine Kalkspatplatte auf ein bedrucktes Blatt legt. Alle Buchstaben erscheinen dann doppelt (Fig. 373, a. f. S.).

Fig. 371.

Rasmus Bartholin.

Fällt ein Lichtstrahl senkrecht auf eine der Seitenflächen des Kristalls, so teilt er sich in zwei Strahlen, von denen der eine in den Kristall eintritt, ohne eine Brechung zu erleiden, während der andere gebrochen wird. Nachdem die beiden Strahlen den Kristall durchlaufen haben, verlassen sie denselben in paralleler Richtung (Fig. 374).

Fig. 372.



Kalkspatrhomboeder.

Fällt ein Lichtstrahl schief auf die Kristallfläche, so teilt er sich in zwei Strahlen, von denen der eine das gewöhnliche Brechungsgesetz befolgt, während sich der andere in der Regel aus der Einfallsebene entfernt. Der erstere ist der sogen. gewöhnlich gebrochene oder ordinäre, der letztere der außergewöhnlich gebrochene oder extraordinäre Strahl (Fig. 375).

Digitized by Google

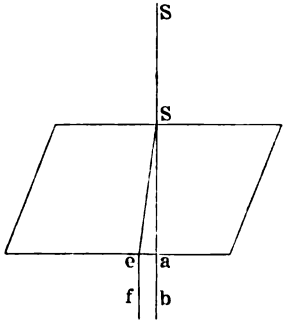
Schleift man an ein natürliches Kalkspatrhomboeder noch andere Flächen an, so beobachtet man, daß das Licht, je nach der Richtung, die der Strahl im Kristall hat, in sehr verschiedener Weise gebrochen wird. Zwei Ecken, *a* und *b* (Fig. 372), werden von drei stumpfen Winkeln gebildet. Eine Linie, welche

Fig. 378.

Doppelbrechung.

im Kristall denselben Winkel mit den drei Seitenflächen bildet, heißt die optische Achse des Kristalls. Wenn man eine Fläche senkrecht zu dieser Richtung an den Kristall anschleift und einen Strahl senkrecht zu dieser Fläche in den Kristall eintreten läßt, so wird der Strahl nicht gespalten, sondern er geht ohne Brechung durch den Kristall hindurch. In der Richtung der optischen Achse findet keine Doppelbrechung statt.

Fig. 374.



Doppelbrechung.

Jede durch die optische Achse eines Kalkspatkristalls gelegte Ebene heißt ein Hauptschnitt. Tritt ein Lichtstrahl im Hauptschnitt ein, so bleiben beide Strahlen, der ordinäre und der extraordinäre, in der Einfallsebene, also im Hauptschnitt, aber sie werden ungleich stark gebrochen. Ist die Einfallsebene des Strahls dagegen nicht ein Hauptschnitt, so verläßt der extraordinäre Strahl die Einfallsebene und seine Brechung ist für verschiedene Einfallswinkel verschieden, aber immer geringer als die Brechung des ordinären Strahls.

Huygens (§ 158) und zahlreiche andere Forscher nach ihm haben nachgewiesen, daß in allen Kristallen, die eine sogen. kristallographische Hauptachse besitzen (die quadratischen und die hexagonalen Kristalle), das Licht in derselben Weise, wie im Kalkspat, gebrochen wird. Der eine Strahl befolgt das gewöhnliche Brechungsgesetz, der andere dagegen nicht. Derartige Kristalle heißen optisch-einachsig. Die optische Achse, d. h. die Richtung, in welcher keine Doppelbrechung stattfindet, fällt mit der kristallographischen Hauptachse zusammen. Auch in den sogen. optisch-zweiachsigen Kristallen findet Doppelbrechung statt, aber keiner der beiden Strahlen befolgt das gewöhnliche Brechungsgesetz. Diese Kristalle, die sogen. rhombischen, monoklinen und tri-

Digitized by Google

klinen, besitzen zwei optische Achsen, d. h. zwei Richtungen, in denen keine Doppelbrechung stattfindet. In den sogen. regulären Kristallen findet überhaupt keine Doppelbrechung statt.

§ 396. Alle diese neuen Erkenntnisse hatten notwendigerweise zur Folge, daß man das Bedürfnis empfand, sich eine bestimmte Ansicht über die Natur des Lichtes zu bilden. Es kann als eine allgemeine Regel bezeichnet werden, daß, wenn sich bei wissenschaftlicher Arbeit eine gewisse Menge von Erfahrungsmaterial angesammelt hat, eine Hypothese aufgestellt wird, die die zahlreichen Einzelheiten unter einem gemeinsamen Gesichtspunkt zusammenfaßt. Die Hypothese (Annahme, Vermutung) bedeutet nicht einen Abschluß der Forschung, sondern in der Naturforschung ist gerade diejenige Hypothese die fruchtbarste, die eine Reihe bedeutender Entdeckungen hervorruft, alsbald überflüssig wird und durch eine neue umfassendere Hypothese ersetzt wird. Aber es ist nützlich, ja man kann sagen notwendig, daß die Forschung ihre Resultate jederzeit unter einem allgemeinen Gesichtspunkt zusammenfaßt, der die Grundlage für ein planmäßiges Weiterarbeiten bildet. Es darf dabei aber nicht vergessen werden, daß die Hypothese nicht das letzte Wort der Wissenschaft ist. Die Hypothese ist nicht gleichbedeutend mit der Erkenntnis der absoluten Wahrheit und darf daher nicht kanonisiert werden, da sie in diesem Falle ein Hindernis für die freie Forschung bilden würde.

Nach der im Altertum herrschenden Auffassung bestand das Licht aus kleinen Teilchen, die von dem leuchtenden Körper ausgesandt werden. Diese Ansicht war schon von Demokritos von Abdera ausgesprochen worden, und sie blieb während des ganzen Mittelalters in Geltung.

Grimaldi und Hooke bezeichneten das Licht als eine Wellenbewegung, ohne sich eine bestimmte Vorstellung von der Art dieser Bewegung zu bilden.

Newton war sich bewußt, daß die Frage nach der Natur des Lichtes eine außerordentlich schwierige war, und er hätte sich am liebsten über dieselbe gar nicht ausgesprochen. Seine Entdeckungen über die Farben hatte er veröffentlicht, ohne diese Frage zu berühren, und seine Resultate standen fest, einerlei wie man sich das Wesen des Lichtes vorstellte. Auf Drängen seiner Freunde veröffentlichte er seine Lichttheorie, die ihn jedoch selbst nicht vollkommen befriedigte.

§ 397. Er nahm an, daß jeder leuchtende Körper kleine Teilchen aussendet, die, wenn sie die Netzhaut treffen, Lichteindrücke hervorbringen. Den verschiedenen Farben entsprechen ungleich große Teilchen, den violetten Strahlen die kleinsten, den roten die größten.

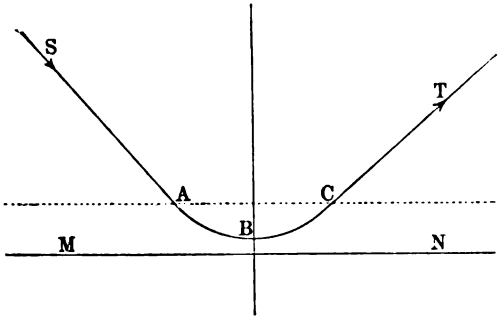
Die Spiegelung erklärt sich nach dieser Theorie leicht. Man kann die Lichtteilchen als elastische Körper betrachten. Wenn diese gegen eine glatte Fläche anprallen, so werden sie so zurückgeworfen, daß der Reflexionswinkel gleich dem Einfallswinkel ist. Dabei ist jedoch die Schwierigkeit, daß, wenn die Lichtteilchen hinreichend klein sind, keine Oberfläche im Verhältnis zu ihnen als eben betrachtet werden kann. Newton nahm daher an, daß der spiegelnde Körper auf die Lichtteilchen eine Abstoßung ausübt und daß diese

Digitized by Google

Abstoßung den Teilchen die in Fig. 375 dargestellte Bahn erteilt. Ein Lichtteilchen bewegt sich nach dieser Annahme in der Nähe der spiegelnden Fläche in einer krummen Linie.

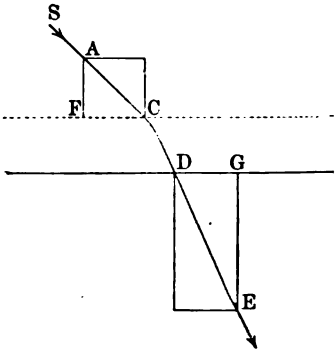
Die Brechung erklärte Newton durch die Annahme, daß zwischen den Lichtteilchen und dem brechenden Körper eine Anziehung stattfindet. Ein

Fig. 375.



Newtons Erklärung der Spiegelung.

Fig. 376.



Newtons Erklärung der Brechung

Lichtteilchen, welches sich einem solchen Körper auf dem Wege AC nähert, geht infolge der Anziehung auf der krummen Linie CD (vergl. die Bahn für einen geworfenen Körper, § 168) und dann im Inneren des Körpers in der Richtung DE weiter (Fig. 376). Die Anziehung hat nur Einfluß auf diejenige Komponente der Geschwindigkeit, die auf der brechenden Fläche senkrecht steht. Macht man $FC = DG$, so sind AC und DE Strecken, die in gleichen Zeiten durchlaufen werden. Wenn die Erklärung richtig wäre, so müßte angenommen werden, daß die Geschwindigkeit des Lichtes im dichteren Medium größer ist als im dünneren. Foucault hat aber bewiesen, daß die Geschwindigkeit im Wasser geringer ist als in der Luft (§ 288).

§ 398. Eine Hauptschwierigkeit der Newtonschen Theorie liegt darin, daß die Reflexion durch Abstoßung und die Brechung durch Anziehung erklärt wird. Ein Körper, der zugleich spiegelnd und brechend wirkt, müßte also auf einige Lichtteilchen abstoßend und auf andere anziehend wirken.

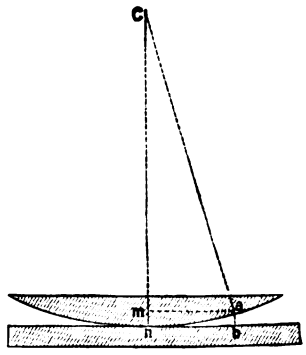
Newton suchte die Schwierigkeit dadurch zu heben, daß er annahm, ein Lichtstrahl enthalte zwei verschiedene Arten von Lichtteilchen, von denen die einen leichter zurückgeworfen, die anderen dagegen leichter gebrochen werden. Vermittelst dieser Annahme erklärte Newton auch die Entstehung der sogen. Farben dünner Blättchen. Diese Farben, welche man sehr schön an Seifenblasen beobachten kann, waren bereits Boyle und Hooke bekannt. Auch angelaufener Stahl, d. h. Stahl, der mit einem dünnen Oxydhäutchen überzogen ist, zeigt diese Farben. Ferner beobachtet man sie, wenn man Licht auf Wasser fallen läßt, dessen Oberfläche mit einer dünnen Ölschicht bedeckt ist.

Digitized by Google

Newton bediente sich der folgenden Vorrichtung, um diese Farbenerscheinung hervorzurufen. Eine plankonvexe Linse von geringer Krümmung wurde auf eine Glasplatte gelegt. Es entsteht dann zwischen beiden ein schmaler, keilförmiger Raum, der mit Luft gefüllt ist. In der Mitte wird die Glasplatte von der Linse berührt, und von hier nach außen hin nimmt die Dicke der Luftschicht zu (Fig. 377).

Ließ er nun einfarbiges, z. B. rotes Licht auf die Gläser fallen, so daß er das reflektierte Licht ins Auge bekam, so beobachtete er in der Mitte einen dunkeln Fleck und um diesen herum abwechselnd helle und dunkle Ringe. Bei Anwendung von weißem Licht war die Mitte ebenfalls dunkel, aber sie war von farbigen Ringen umgeben.

Fig. 377.



Die Newtonschen Farbenringe.

Im durchgehenden Lichte erschien die Mitte hell und von dunkeln und hellen Ringen umgeben, und zwar war da ein heller Ring, wo vorher ein dunkler gewesen war, und umgekehrt. Bei Anwendung von einfarbigem Licht erschien da ein roter Ring, wo vorher ein blaugrüner gewesen war, d. h. die Farbe in dem einen und in dem anderen Falle waren Ergänzungsfarben.

Newton war sich von vornherein klar darüber, daß die Farbenerscheinung durch die Luftschicht verursacht wird. Er füllte den Raum zwischen der Linse und der Glasplatte mit Wasser, und die Ringe erschienen wie in der Luft, nur waren sie bedeutend kleiner.

§ 399. Newton erklärte die Entstehung dieser Ringe durch die Annahme, daß sich die Lichtteilchen in einem Strahl in verschiedenem Zustande befinden, so daß die einen zurückgeworfen, die anderen dagegen gebrochen werden. Denkt man sich die Lichtteilchen eines Strahls wie Perlen auf einer Schnur, so kann man sich vorstellen, daß sich die einzelnen Perlen abwechselnd in dem einen und in dem anderen Zustande befinden. Ferner muß angenommen werden, daß ein Lichtteilchen sich bald in dem einen und bald in dem anderen Zustande befindet. — Die Entstehung der Newtonschen Farbenringe erklärt sich dann in folgender Weise. Das einfarbige Licht, welches auf die Linse fällt und welches den Berührungspunkt trifft, wird nicht zurückgeworfen, sondern geht weiter. Das Licht dagegen, welches diesen Punkt nicht trifft, wird entweder von der Platte zurückgeworfen, wenn es die Luftschicht durchlaufen hat, oder es tritt in die Platte ein. Ob das eine oder das andere geschieht, hängt davon ab, in welchem Zustande das Lichtteilchen an der Platte ankommt. Kommt es im „Zurückwerfungszustande" an, so wird es zurückgeworfen, kommt es dagegen im „Brechungszustande" an, so wird es gebrochen. Wenn nun ein Lichtteilchen, welches die Platte in einem gewissen Abstande vom Berührungspunkt trifft, zurückgeworfen

Digitized by Google

wird, so wird auch das nächste Lichtteilchen in demselben Strahl zurückgeworfen, denn es erreicht die Platte ebenfalls im „Zurückwerfungszustande". Die Zustandsänderung vollzieht sich nämlich in dem Augenblick, in welchem es die Platte erreicht. Dasselbe geschieht mit dem folgenden Lichtteilchen des Strahles. An der betreffenden Stelle der Platte wird also das Licht fortwährend zurückgeworfen, und dasselbe findet an allen Punkten statt, die denselben Abstand vom Mittelpunkt haben. Das von allen diesen Punkten zurückgeworfene Licht bildet einen hellen Ring.

Ob aber ein Lichtteilchen die Platte in dem einen oder in dem anderen Zustande erreicht, hängt offenbar von der Dicke der Luftschicht ab. — Ein Lichtteilchen, welches die Platte weiter vom Mittelpunkt entfernt trifft, hat eine dickere Luftschicht zu passieren. Die Lichtteilchen erreichen die Platte im „Brechungszustande" und sie treten daher in die Platte ein. Auf den hellen Ring folgt daher ein dunkler, auf diesen wieder ein heller, u. s. w. Dieselbe Erklärung gilt auch für die Ringe im durchgehenden Licht. Einem dunkeln Ring im zurückgeworfenen Licht entspricht ein heller Ring im durchgehenden Licht, und umgekehrt.

§ 400. Fällt auf die Linse nicht einfarbiges, sondern weißes Licht, so verändern die Lichtteilchen der verschiedenen Farben ihren „Zustand" nicht zu gleicher Zeit. Man sieht daher nicht abwechselnd helle und dunkle, sondern verschiedenfarbige Ringe, denn an einer Stelle, an welcher die Teilchen einer bestimmten Farbe zurückgeworfen werden, treten die Teilchen der komplementären Farbe in die Platte ein.

§ 401. Wäre das dünne Häutchen (die Luftschicht) überall gleich dick, so würde nur Licht von einer bestimmten Farbe zurückgeworfen werden. Newton hatte die Auffassung, daß alle einfarbigen Körper an und für sich durchsichtig sind. Wenn sie zuweilen undurchsichtig sind, so hat dies seinen Grund darin, daß im Inneren des Körpers lufterfüllte Räume (Poren) vorhanden sind. Ein solcher undurchsichtiger Körper besteht aber an der Oberfläche aus dünnen Blättchen, die je nach ihrer Dicke die eine oder die andere Farbe zurückwerfen, und die Farbe des Körpers ist die „Zurückwerfungsfarbe" dieser dünnen Blättchen.

§ 402. In diesen verwickelten Verhältnissen glaubte Newton eine Stütze für seine Annahme der periodischen Änderung des Zustandes der Lichtteilchen zu besitzen. Man ist versucht zu fragen, ob diese Hypothese ihren Urheber selbst vollkommen befriedigt hat, und man kann ruhig antworten, daß dies nicht der Fall gewesen ist. Nichtsdestoweniger legte Newton einem Lichtstrahl noch andere höchst merkwürdige Eigenschaften bei, um die Erklärung des Grimaldischen Versuches zu ermöglichen. Wir wollen jedoch auf die Betrachtungen Newtons über die Beugung des Lichtes und die gegenseitige Einwirkung zweier Lichtstrahlen aufeinander nicht näher eingehen, sondern uns mit dem begnügen, was über seine Lichttheorie gesagt worden ist. Sie wird die Emissionstheorie (Emanationstheorie, Korpuskulartheorie) genannt,

Digitized by Google

weil sie die Annahme macht, daß von einem leuchtenden Körper kleine materielle Körperchen (corpuscula) ausgesandt werden.

Wir wissen heute ganz bestimmt, daß die Annahme Newtons nicht richtig ist. Das Licht besteht nicht aus materiellen Teilchen, die von den Lichtquellen ausgesandt werden, sondern es ist, wie Grimaldi und Hooke geahnt hatten, eine Wellenbewegung.

§ 403. Der erste, der eine klare und erschöpfende Darstellung dieser Theorie, der sogen. Undulationstheorie, gab, war Chr. Huygens. Seine Abhandlung über diesen Gegenstand erschien 1690 im Druck, nachdem sie bereits 1678 der Pariser Akademie mitgeteilt worden war. Newton kannte sie, aber er konnte sich nicht dazu entschließen, die Emissionstheorie fallen zu lassen und zur Undulationstheorie überzugehen. Dies hat auf die Entwickelung der Lichtlehre einen sehr ungünstigen Einfluß ausgeübt, da die Schüler Newtons an der Lehre des großen Meisters hartnäckig festhielten. So wurde Newton, der gesagt hatte, „Hypothesen mache ich nicht", durch sein ablehnendes Verhalten gegen die Huygenssche Wellentheorie die Ursache, daß die Emissionstheorie kanonisiert wurde.

§ 404. Die Huygenssche Lichttheorie ist in kurzen Zügen die folgende. Der ganze Weltraum ist von einem äußerst feinen und leicht beweglichen Stoff, dem sogen. Äther, erfüllt. Er durchdringt alle Körper und ist überall vorhanden. Der Weltraum bildet so zu sagen ein großes Äthermeer. Findet an irgend einer Stelle in diesem Meer eine Störung des Gleichgewichtes statt, so gehen von dieser Stelle kugelförmige Ätherwellen aus, ebenso wie auf der Oberfläche des Wassers von einer Stelle, an der ein Stein in das Wasser geworfen wird, kreisförmige Wellen ausgehen (vergl. § 349). Die Wellenbewegung im Äther kommt durch die Schwingung der Ätherteilchen ähnlich zustande, wie die Luftwellen durch die Schwingung der Luftteilchen (§ 343).

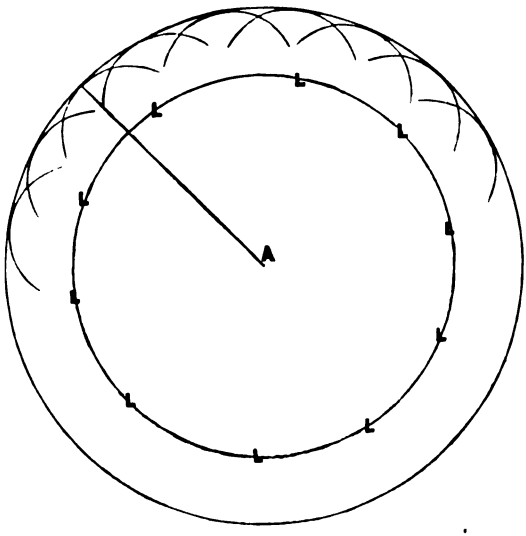
Das, was wir Licht nennen, ist nach Huygens eine Wellenbewegung in diesem Äther, und ein leuchtender Körper setzt die Ätherteilchen in Schwingungen, die in Gestalt von Ätherwellen den Weltraum durchdringen. Wird das Auge von einer solchen Ätherwelle getroffen, so empfängt der Sehnerv den Stoß der Ätherteilchen und dieser wird als Licht empfunden.

§ 405. Daß ein leuchtender Punkt Licht nach allen Richtungen aussendet, bedeutet, daß die Störung, welche der leuchtende Punkt im Äther hervorruft, sich nach allen Richtungen hin fortpflanzt. Es sei A in Fig. 378 (a. f. S.) ein leuchtender Punkt. Wenn nun die von A ausgehende Lichtwelle in einem bestimmten Augenblick in den Punkten LL angekommen ist, so machen die Ätherteilchen in diesen Punkten zu gleicher Zeit ganz ähnliche Bewegungen, wie ursprünglich das im Punkt A befindliche Ätherteilchen. Man kann daher die Ätherteilchen in LL als Ausgangspunkt neuer Wellen betrachten, die nach kurzer Zeit auf den kleinen Kreisen angekommen sind, deren Mittelpunkte in LL liegen. Alle diese kleinen Wellen bilden aber zusammen eine große, die sogen. einhüllende Welle, deren Fläche mit der Wellenfläche LL kon-

Digitized by Google

zentrisch ist. Jede von A ausgehende Linie, d. h. jeder Radius der Wellenkugel, heißt ein Strahl. Wenn die Welle vom Punkt A aus weit fortgeschritten ist, so kann man einen kleinen Teil derselben als eben ansehen. Diesem kleinen Teil der Wellenfläche entspricht eine gewisse Menge von Strahlen, die als parallel angesehen werden können. **Die Wellenfläche paralleler Strahlen ist eine Ebene, die auf der Richtung der Strahlen senkrecht steht.**

Fig. 378.



Huygens'sches Prinzip.

§ 406. Das Spiegelungsgesetz leitete Huygens aus seiner Wellentheorie in folgender Weise ab. Es sei SS (Fig. 379) ein Bündel Lichtstrahlen, welches auf eine spiegelnde Glasfläche fällt. Die Wellenfläche steht senkrecht auf der Richtung der Strahlen und diese erreichen daher die spiegelnde Fläche nicht zu gleicher Zeit. Der Strahl SA kommt zuerst und der Strahl SB zuletzt an. In dem Augenblick, in welchem SA ankommt, wird A der Ausgangspunkt einer neuen Welle, die sich zum Teil in der Luft und zum Teil im Glas (als Halbkugel) ausbreitet. Während der Strahl SB von B bis C fortschreitet, schreitet die von A ausgehende Welle ebenso weit fort, d. h. sie bildet in dem Augenblick, in welchem die Bewegung von B bis C fortgeschritten ist, eine Kugelfläche, deren Radius AM ebenso groß wie BC ist. Ein anderer Strahl SDE hat eine Welle um E erzeugt u. s. w. Die Strahlen des Lichtbündels haben also eine Reihe von kugelförmigen Wellen erzeugt, die in dem Augenblick, in dem SB in C ankommt, zusammen die ebene Welle CM bilden, die sich in ähnlicher Weise wie die einfallende ebene Welle AB fortpflanzt. Da nun die Richtung der Strahlen senkrecht auf der Wellenfläche steht, so geht von der spiegelnden Fläche ein Strahlenbündel aus, welches mit der spiegelnden Fläche denselben Winkel bildet, wie das einfallende Strahlenbündel (die Dreiecke ABC und AMC sind kongruent). Der Reflexionswinkel ist also gleich dem Einfallswinkel (vergl. § 350).

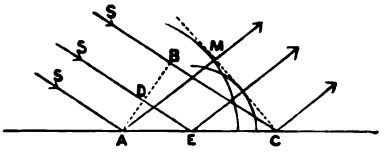
Vom Punkt A (Fig. 380) aus tritt aber auch eine kugelförmige Welle in das Glas ein. Diese Welle schreitet aber nicht mit derselben Geschwindigkeit wie die Welle in der Luft fort. Huygens nimmt an, daß der Äther im Glase eine größere Dichtigkeit besitzt als in der Luft und daß die Geschwindigkeit der Welle daher im Glase geringer ist. Die Folge hiervon muß offenbar

Digitized by Google

sein, daß alle von Punkten der spiegelnden Fläche ausgehenden Wellen kürzere Radien bekommen als die entsprechenden Wellen, welche zu gleicher Zeit von diesen Punkten in die Luft gehen. Infolgedessen bilden die Wellen im Glase die ebene Welle CN (Fig. 380), die sich im Glase so fortsetzt, daß die Richtung der Strahlen AN ist.

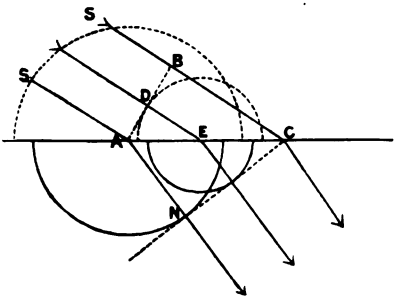
Die Änderung der Strahlenrichtung beim Übergang des Lichtes aus Luft in Glas läßt sich durch das folgende Bild veranschaulichen. Man denkt sich eine Abteilung Soldaten, die so marschieren, daß die Marschrichtung senkrecht auf der Frontlinie steht. Der brechenden Fläche, d. h. der Grenzfläche

Fig. 379.



Spiegelung.

Fig. 380.



Brechung.

zwischen Luft und Glas, entspricht dann die Grenzlinie zwischen einem ebenen festen Boden und einem lockeren Boden, etwa einem frisch gepflügten Acker. Auf dem ersteren Boden marschieren die Soldaten schneller als auf dem letzteren.

Bildet die Grenze einen Winkel mit der Frontlinie, so werden die Soldaten der vordersten Reihe das gepflügte Land nicht zu gleicher Zeit betreten. Dies hat zur Folge, daß sich die Frontlinie und daher auch die Marschrichtung ändert. Die Größe des Winkels, den die neue Richtung mit der alten bildet, hängt von dem Verhältnis der Geschwindigkeiten auf dem festen und dem lockeren Boden ab. Ebenso hängt die Größe der Lichtbrechung von dem Unterschiede der Dichtigkeit des Äthers in der Luft und dem anderen Stoffe ab. Je größer dieser Unterschied ist, desto stärker ist die Brechung.

§ 407. Ein schwacher Punkt des Werkes von Huygens bestand darin, daß die Entstehung der Farben in demselben nicht erklärt wurde. Dies war ohne Zweifel einer von den Gründen, die Newton veranlaßten, sich der Wellentheorie gegenüber ablehnend zu verhalten. Außerdem war er deshalb ein Gegner der Huygensschen Theorie, weil er glaubte, der Äther müsse, wenn er auch noch so beweglich sei, einen merklichen verzögernden Einfluß auf die Bewegung der Himmelskörper ausüben.

Diese Bedenken Newtons wurden 41 Jahre nach seinem Tode, im Jahre 1768, von Leonhard Euler (II, § 230) beseitigt. Euler bekämpfte überhaupt die ganze Emissionstheorie. Er meinte, wenn die Sonne wirklich materiellen Lichtstoff aussende, so müsse die Masse derselben nach und nach

Digitized by Google

geringer werden. Er konnte sich ferner nicht denken, wie die Lichtteilchen von der Sonne und den Sternen den Raum durchfliegen könnten, ohne daß sie zusammenstoßen und dadurch ihre Richtung ändern. Am schwierigsten aber war es nach seiner Ansicht, die Emissionstheorie mit der Tatsache in Einklang zu bringen, daß es vollständig durchsichtige Körper gibt. Wenn nämlich das Licht etwas Materielles ist, so muß der Lichtstoff durch die durchsichtigen Körper hindurchfahren, und da diese Körper in allen Richtungen durchsichtig sind, so müssen in allen Richtungen Poren vorhanden sein, während doch die durchsichtigen Körper kompakt sind. Euler schrieb seine Abhandlungen in Form von Briefen an eine deutsche Fürstin und schloß seine Besprechung der Emissionstheorie mit folgenden Worten: „Ich glaube, daß die angeführten Gründe Eure Hoheit davon überzeugen werden, daß die Emissionstheorie in keiner Weise Bekräftigung in der Natur findet, und Eure Hoheit wird sich sicher darüber wundern, daß eine derartige Lehre von einem so großen Geiste (wie Newton) aufgestellt und von so vielen klaren Denkern angenommen werden konnte. Aber bereits Cicero hat gesagt, daß man sich nichts denken könne, was zu abenteuerlich sei, als daß es von einem Philosophen behauptet werden könne. Aber ich für mein Teil bin zu wenig Philosoph, um ihre Auffassung von der Natur des Lichtes teilen zu können."

Newtons Einwendung gegen den Äther, daß er die Bewegung der Himmelskörper hindern müsse, konnte, wie Euler hervorhob, ebenso gut gegen den Lichtstoff gemacht werden, denn der Raum, in dem sich die Planeten bewegen, ist ja nach Newtons Emissionstheorie keineswegs leer. Er ist vielmehr von Lichtteilchen angefüllt, die in allen Richtungen mit der ungeheueren Geschwindigkeit von 40 000 Meilen in der Sekunde umherfliegen und die den Lauf der Planeten mindestens in gleichem Grade stören können wie der Äther.

Die große Geschwindigkeit des Lichtes fand Euler weit verständlicher, wenn das Licht eine Wellenbewegung im leicht beweglichen Äther ist, als wenn der Raum von materiellen Teilchen erfüllt ist, die mit einer solchen Geschwindigkeit umherfliegen. Aus der Lehre vom Schall wußte er (vergl. § 346), daß sich Schwingungen in einem elastischen Körper sehr schnell fortpflanzen können. Wenn der Äther viel feiner und beweglicher als die Luft ist, so können die Ätherwellen viel schneller fortschreiten als die Schallwellen. „Wir wissen ja, daß die Geschwindigkeit des Schalles um so größer ist, je geringer die Dichtigkeit der Luft ist. . . . Denken wir uns also die Luft hinreichend leicht und ihre Elastizität hinreichend groß, so kann man sich vorstellen, daß die Geschwindigkeit des Schalles so groß wird wie die Geschwindigkeit des Lichtes." Es ist auch nicht gut zu verstehen, wie das Auge imstande sein soll, die Stöße dieser heftig bewegten Lichtteilchen zu ertragen.

Von großer Bedeutung war es, daß Euler in demselben Brief an die deutsche Fürstin eine auf die Wellentheorie begründete Erklärung der Farben entwickelte. Er vergleicht die Farben mit den Tönen. Von den letzteren wußte er, daß ihre Höhe von der Schwingungszahl abhängt (§ 336). Die

Digitized by Google

hohen Töne haben eine größere, die tieferen eine kleinere Schwingungszahl. Euler vermutete, daß die verschiedenen Farben untereinander in einer ähnlichen Beziehung stehen wie die verschiedenen Töne. Das Licht besteht wie der Schall aus Schwingungen, der letztere aus Luftschwingungen, das erstere aus Ätherschwingungen, und jeder Farbe entspricht ebenso wie jedem Ton eine bestimmte Schwingungszahl.

Wie man die Schwingungszahl der Farbenstrahlen messen kann, wird später (§ 410) erklärt werden. Hier wollen wir die weiteren Betrachtungen Eulers über die Farben verfolgen.

Wenn ein Körper von einem Lichtstrahl getroffen und leuchtend wird, so geschieht dies nach Eulers Ansicht nicht dadurch, daß von dem Körper Licht zurückgeworfen wird. Die Lichtstrahlen haben vielmehr die Wirkung, daß die Oberfläche des Körpers in Schwingung versetzt wird. Die Bewegung der Ätherteilchen geht auf die Oberflächenteilchen über. Euler betrachtet die Oberfläche eines Körpers als ein Saiteninstrument, dessen Saiten durch die Ätherwellen in Bewegung gesetzt werden (vergl. § 355). Hat nun eine „Oberflächensaite" eine solche Spannung, daß sie in demselben Takt wie rotes Licht schwingt, dann nennen wir die Oberfläche des Körpers rot. Um einen roten Körper leuchtend zu machen, ist rotes Licht erforderlich, denn nur dieses kann die Oberfläche in Schwingung versetzen. Licht von anderer Farbe, d. h. von anderer Schwingungszahl, kann die Oberfläche nicht in Schwingung versetzen. Das Sonnenlicht, sagt Euler, muß alle Farben enthalten, denn es erleuchtet alle Körper, welche Farbe sie auch haben. Die Geschwindigkeit der Schwingungen konnte Euler nicht angeben. Was er aussprach, war also nur eine Hypothese. Heute ist es nicht schwer, die Richtigkeit dieser Hypothese zu beweisen.

§ 408. Aber die Autorität Newtons war so groß, daß die Emissionstheorie bis zum Beginne des 19. Jahrhunderts ihre Herrschaft behauptete. Die Streitfrage wurde 1800 in den „Philosophical Transactions", der Zeitschrift der Royal Society, von neuem durch Thomas Young angeregt. Er war 1773 in Milverton geboren. Seine Eltern lebten in dürftigen Verhältnissen und gehörten der Sekte der Quäker an. Er besuchte, von seinem Großvater unterstützt, die Universitäten in London, Edinburg und Göttingen. Er studierte vorzugsweise Medizin, beschäftigte sich aber auch mit physikalischen und sprachlichen Studien. Von 1801 bis 1804 war er Professor an der Royal Institution. Er schied aus dieser Stellung aus, um ausschließlich als Arzt tätig zu sein. Er war jedoch mehr für rein wissenschaftliche Arbeiten beanlagt, und er warf sich jetzt von neuem auf die sprachlichen und physikalischen Studien, denen er auch früher sein Interesse zugewandt hatte. Als Sprachgelehrter gab er einen Schlüssel zur Deutung der Hieroglyphen heraus und als Physiker debütierte er mit einer Abhandlung über den Schall. Hier kamen ihm seine medizinischen Kenntnisse und sein feiner musikalischer Sinn zu statten. Seit 1818 gab er das „Nautical Almanac" heraus. Er starb 1829. Seine Abhandlungen erstrecken sich über alle Gebiete der Physik. Ein

Digitized by Google

Landsmann schrieb über ihn: „Sein Talent war groß, seine Arbeitskraft unermüdlich, sein Wandel tadellos, sein Glaube orthodox, aber tolerant.“

§ 409. Seine Abhandlung aus dem Jahre 1800 handelte über Schall und Licht. Er lenkte die Aufmerksamkeit auf zwei schwache Punkte in Newtons Lichttheorie. Es ist sehr schwer zu verstehen, sagt er, wie die Emissionstheorie erklären kann, daß sich das von verschiedenen Lichtquellen ausgehende Licht mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzt. Wie kann man voraussetzen, daß alle Lichtquellen, seien sie noch so verschieden, die Lichtteilchen mit derselben Geschwindigkeit aussenden? Ebensowenig kann sich Young mit Newtons Theorie der periodischen Verwandlungen der Lichtteilchen in einem Lichtstrahl (§ 399) befreunden, und ohne diese Verwandlungen kann die Emissionstheorie nicht erklären, daß ein und derselbe Strahl zum Teil reflektiert und zum Teil gebrochen wird. Dagegen lassen sich die Erscheinungen durch die Wellentheorie leicht erklären.

Fig. 381.

Thomas Young.

Das wichtigste in der Abhandlung war die Erklärung der Entstehung der Newtonschen Farbenringe durch die Interferenz der Wellen. Zwei Wellen können sich verstärken und schwächen. Haben sie dieselbe Wellenlänge, so verstärken sie sich am meisten, wenn der Wegunterschied eine gerade Anzahl halber Wellenlängen beträgt, und schwächen sich am meisten, wenn der Wegunterschied eine ungerade Anzahl halber Wellenlängen beträgt (vergl. § 354).

In seiner Abhandlung aus dem Jahre 1800 erklärte Young die Entstehung der Newtonschen Farbenringe in folgender Weise. Wenn einfarbige Strahlen *ss* (Fig. 382) auf eine dünne Platte fallen, so wird der Strahl *sa* nach *b* gebrochen, nach *c* zurückgeworfen und beim Austritt aus der Platte nochmals gebrochen, so daß er in der Richtung *cd* austritt. Vom Strahl *sc* wird ein Teil von der Oberfläche der Platte in der Richtung *cd* zurückgeworfen. Auf diese Weise wird *cd* sozusagen ein Doppelstrahl, d. h. in der Richtung *cd* schreiten zwei Wellen fort, und diese Wellen haben verschiedene Wege durchlaufen, die eine den Weg *sabcd*, die andere den Weg *scd*. Wenn nun der Unterschied der Wege eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen beträgt, so verstärken sich die beiden Strahlen, und wenn der Unterschied eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen beträgt, so schwächen sich die Strahlen gegenseitig. Ja, wenn die beiden Wellen gleich stark sind, so heben

Digitized by Google

sie sich im letzteren Falle vollständig auf, so daß in der Richtung *cd* gar keine Bewegung stattfindet, also kein Licht fortschreitet.

Diese Betrachtung kann offenbar leicht auf den Newtonschen Versuch (§ 398, Fig. 377) angewandt werden. Hier ist die dünne Platte die Luftschicht zwischen der Linse und der Glasplatte. Die Lichtstrahlen nehmen den durch Fig. 382 bezeichneten Weg. Der Wegunterschied ist gleich der doppelten

Fig. 382.

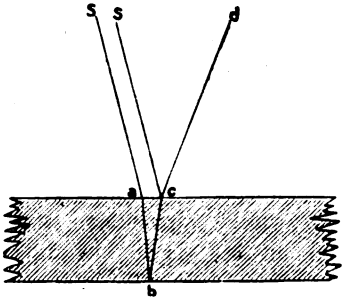
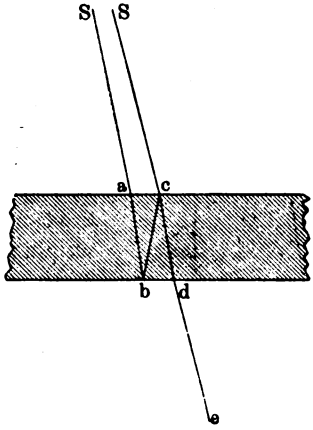


Fig. 383.



Youngs Erklärung der Newtonschen Farbenringe.

Dicke der Luftschicht. Da diese aber nach außen hin zunimmt, so wird das zurückgeworfene Licht bald aus Wellen bestehen, die sich verstärken, bald aus Wellen, die sich schwächen. Man wird also um den dunkeln Fleck in der Mitte der Linse herum abwechselnd helle und dunkle Ringe sehen (Fig. 379).

Daß auch das durch die Linse, die Luftschicht und die Glasplatte hindurchgehende Licht dieselbe Erscheinung hervorrufen muß, ergibt sich aus Fig. 383. Der Strahl *Sabcde* und der Strahl *Scde* treten beide in der Richtung *de* aus und müssen sich je nach Umständen verstärken oder schwächen. — Vergleicht man die beiden Figuren 382 und 383, so erkennt man leicht, daß der Wegunterschied der Strahlen in beiden Fällen derselbe ist. Man erwartet also, daß auch die Interferenz (Verstärkung oder Schwächung) in beiden Fällen dieselbe sein müsse. In Wirklichkeit verstärken sich aber die reflektierten Strahlen, wenn sich die durchgehenden Strahlen schwächen, und umgekehrt. Young erkannte auch die Ursache dieser Erscheinung. Wenn nämlich die Ätherwelle von einem optisch dichteren Stoff zurückgeworfen wird, d. h. wenn die Ätherwelle aus einem Stoff, in welchem der Äther eine geringere Dichtigkeit hat, in einen Stoff übergeht, in welchem der Äther eine größere Dichtigkeit hat, so verliert er eine halbe Wellenlänge.

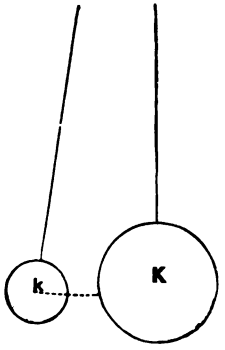
Dies steht im Einklang mit den Erscheinungen des Stoßes elastischer Kugeln. Wenn ein Ätherteilchen während seiner schwingenden Bewegung auf ein anderes Ätherteilchen in einem Körper stößt, in welchem die Dichtigkeit

Digitized by Google

des Äthers größer ist, so findet dasselbe statt wie bei dem Stoß einer kleineren Kugel gegen eine größere. Die kleinere Kugel vollendet ihre Schwingung nicht, sondern sie wird zurückgeworfen, mit anderen Worten, sie verliert eine halbe Wellenlänge (vergl. Fig. 338 I).

Bei der Entstehung der Newtonschen Farbenringe findet aber eine solche Zurückwerfung statt, in Fig. 382 bei *b*, und in Fig. 383 bei *b* und bei *c*. Im zurückgeworfenen Licht hat also der eine Strahl eine halbe Wellenlänge, im durchgehenden Licht dagegen zwei halbe Wellenlängen verloren. Wo sich also die zurückgeworfenen Strahlen aufheben, müssen sich die durchgehenden verstärken.

Fig. 384.



Verlust einer halben Wellenlänge.

§ 410. Diese Betrachtungen gelten für einfarbiges Licht. — Die Newtonschen Farbenringe bieten nun ein Mittel, die Wellenlänge des Lichtes zu messen. Wir wollen annehmen, der Versuch werde mit rotem Licht ausgeführt, wir betrachten dann nach der Anweisung von Young zwei aufeinander folgende Ringe. Die Luftschicht an der Stelle des äußeren der beiden Ringe muß um eine halbe Wellenlänge des roten Lichtes dicker sein als die Luftschicht an der Stelle des inneren der beiden Ringe. Wenn dies nämlich der Fall ist, dann müssen sich die Strahlen, welche den äußeren Ring bilden, in demselben Interferenzzustande befinden wie diejenigen, welche den inneren Ring bilden. Da das Licht die Luftschicht hin und her durchläuft, so wird der vom Licht zurückgelegte Weg um eine ganze Wellenlänge größer, wenn die Dicke der Luftschicht nur eine halbe Wellenlänge größer wird. Wenn aber eine Welle in ihrer Bewegungsrichtung um eine Wellenlänge verschoben wird, so entstehen die Wellenberge und die Wellentäler nach der Verschiebung an denselben Stellen wie vor der Verschiebung.

Newton hatte nun die Dicke der Luftschicht an den hellen und den dunkeln Stellen genau gemessen, so daß Young ohne weiteres die Größe der Wellenlänge angeben konnte. — Wie für das rote Licht, so kann man natürlich auch für jede andere Farbe die Wellenlänge ermitteln.

Kennt man die Größe der Wellenlänge und weiß man, mit welcher Geschwindigkeit die Wellenbewegung fortschreitet (in diesem Falle die Geschwindigkeit des Lichtes), so kann man die Schwingungszahl eines Ätherteilchens berechnen, welches an der Bewegung teilnimmt. Die Geschwindigkeit ist nämlich gleich dem Produkt aus der Wellenlänge und der Schwingungszahl (§ 341). Man erhält also die Schwingungszahl, indem man die Geschwindigkeit durch die Wellenlänge dividiert.

Die Strahlen von verschiedener Farbe pflanzen sich aber alle mit derselben Geschwindigkeit, ungefähr 310 000 km, fort (vergl. § 287). Für die mittleren Strahlen der verschiedenen Farben werden die Wellenlängen und Schwingungszahlen durch die folgenden Zahlen ausgedrückt:

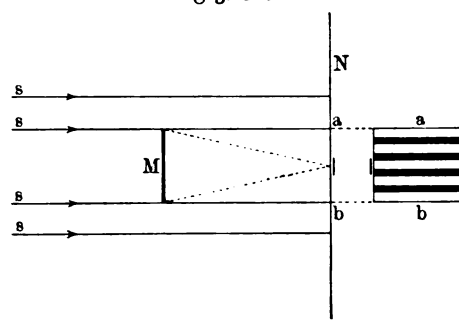
Digitized by Google

	Wellenlänge		Schwingungszahl
Rot	0,000 620	Rot	500 Billionen
Orange	0,000 583	Orange	532 „
Gelb	0,000 551	Gelb	562 „
Grün	0,000 521	Grün	595 „
Blau	0,000 475	Blau	653 „
Violett	0,000 423	Violett	733 „

Die roten Strahlen haben die größte Wellenlänge und die kleinste Schwingungszahl, die violetten die kleinste Wellenlänge und die größte Schwingungszahl. Die Farben des sichtbaren Sonnenspektrums bilden ungefähr eine Oktav, d. h. die Schwingungszahl der äußersten violetten Strahlen ist doppelt so groß als die Schwingungszahl der äußersten roten Strahlen.

§ 411. Hiermit hatte Young die Richtigkeit der Eulerschen Hypothese bewiesen, daß jede Farbe ebenso wie jeder Ton seine bestimmte Schwingungszahl hat. Aber er hielt es, wie man sich leicht denken kann, für wünschenswert, noch auf einem anderen Wege eine Bestätigung seiner Theorie zu finden. Dies gelang ihm auch mit Hilfe der Beugungserscheinungen. Er ließ einen schmalen Schirm *M* (Fig. 385) auf einen größeren Schirm *N* einen Schatten werfen. Wenn sich das Licht geradlinig fortpflanzte, so würde der Schirm *M* den Schatten *ab* werfen. Allein das Licht wird, wie Grimaldi nachgewiesen hatte, gebeugt (§ 393), und es erscheinen, wenn das Licht monochromatisch ist, in dem Schatten helle und dunkle Streifen. Diese Streifen erklärte Young durch die Interferenz der Lichtwellen. In der Mitte des Schattens erscheint ein heller Streifen. Die Lichtwellen haben vom Rande des Schirms bis an diese Stelle gleiche Wege zurückgelegt. Sie kommen daher in gleichem Schwingungszustande an und verstärken sich. Zu beiden Seiten dieses hellen Streifens liegt je ein dunkler Streifen, da von diesen Stellen aus der Weg nach dem einen Rande des Schirms um eine halbe Wellenlänge länger ist als der Weg nach dem anderen Rande. Die Strahlen kommen hier in entgegengesetztem Schwingungszustande an und schwächen sich daher. Dann folgen wieder zwei helle Streifen, nämlich da, wo die Wegdifferenz gleich einer ganzen Wellenlänge ist und sich die Strahlen daher

Fig. 385.



Youngs Interferenzversuch.

Digitized by Google

verstärken, u. s. w. Die Streifenbildung wird also durch die Interferenz vollständig erklärt. Young maß nun den Abstand zwischen zwei hellen Streifen im Schatten, und da er den Abstand des schattenwerfenden Schirmes *M* vom Schirm *N* kannte, konnte er die Wegdifferenz der Strahlen, also die Wellenlänge, berechnen. So bildeten diese Versuche eine Kontrolle für die aus der Erscheinung der Newtonschen Ringe abgeleiteten Resultate. Wird der Versuch nicht mit einfarbigem Licht, sondern mit Sonnenlicht ausgeführt, so erscheinen nicht helle und dunkle, sondern farbige Streifen. Der mittlere Streifen ist auch in diesem Falle weiß, da in ihm die verschiedenen farbigen Strahlen des Sonnenlichtes in gleichem Schwingungszustande zusammentreffen und sich daher verstärken. Unmittelbar neben dem Mittelstreifen vernichten sich zuerst die violetten Strahlen, dann die blauen, dann die grünen, u. s. w. An den betreffenden Stellen erscheinen also der Reihe nach die Ergänzungsfarben von Violett, Blau, Grün, u. s. w. Diese Farben bilden ein sogen. Interferenzspektrum oder Beugungsspektrum.

§ 412. Die Arbeiten Youngs fanden übrigens durchaus keine wohlwollende Aufnahme. Sie erfuhren von seiten eines jungen englischen Physikers eine abweisende Kritik, und auch die älteren Zeitgenossen Youngs wollten sich mit seiner Theorie nicht befreunden, zumal sie in einer kurzgefaßten und nicht leicht verständlichen Weise abgefaßt war. Auch machte es Young Schwierigkeit, zu erklären, wie die Newtonschen Farbenringe im durchgehenden Licht, durch Interferenz entstehen. Da er ferner eine neue Entdeckung, die der französische Physiker Etienne Malus im Jahre 1810 gemacht hatte, nicht erklären konnte, fing er selbst an, die Richtigkeit seiner Theorie zu bezweifeln.

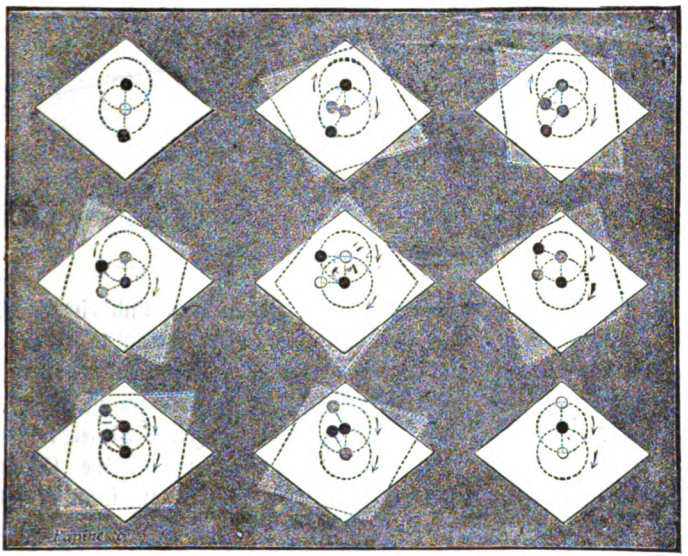
§ 413. Malus (1775 bis 1812) war Ingenieurkapitän und war als solcher mit Napoleon in Ägypten gewesen. Im Jahre 1809 wurde er Lehrer an der Polytechnischen Schule in Paris, der er selbst als Schüler angehört hatte.

Seine Berühmtheit als Physiker verdankt er einer Entdeckung, die er machte, als er eine Preisaufgabe der französischen Akademie über die Doppelbrechung des Lichtes bearbeitete. — Er experimentierte mit Kalkspat (§ 395) und blickte zufällig durch eine Kalkspatplatte nach dem Luxembourgpalast, in dessen Fenstern sich die untergehende Sonne spiegelte. Zu seinem Erstaunen bemerkte er durch die Kalkspatplatte nur ein Bild der Fenster des Palastes. Sonst sah er die Gegenstände durch die Platte doppelt. Da es sich offenbar um reflektiertes Licht handelte, ließ er, um die Sache aufzuklären, Licht von einer Flamme auf eine Glasplatte oder auf eine Wasseroberfläche fallen und das reflektierte Licht durch eine Kalkspatplatte in das Auge eintreten. Er fand, daß bei einer bestimmten Stellung der Kalkspatplatte das reflektierte Licht nicht doppelt gebrochen wird. Wurde die Platte aber gedreht, so kam die Doppelbrechung zum Vorschein, und die beiden Bilder waren in der Regel ungleich hell. Nur in einer bestimmten Stellung waren sie gleich hell.

Digitized by Google

Diese Erscheinung erinnerte in hohem Grade an eine andere, die Huygens beobachtet hatte, als er einen dunkeln Punkt in einer weißen Platte durch zwei Kalkspatplatten betrachtete. Durch eine Platte gesehen erschien der Punkt doppelt. Das eine Bild rührte von den gewöhnlich gebrochenen Strahlen her, das andere von den außergewöhnlich gebrochenen Strahlen. Diese beiden Strahlen sollten nun durch eine zweite Kalkspatplatte gehen. Wenn sich diese Platte in derselben Stellung befand wie die erste, so gingen beide Strahlen ungeteilt hindurch. Der gewöhnlich gebrochene Strahl ging auch durch die zweite Platte als gewöhnlich gebrochener Strahl und der aus der ersten Platte austretende außergewöhnlich gebrochene Strahl ging auch

Fig. 386.



Doppelbrechung im Kalkspat.

durch die zweite Platte als außergewöhnlich gebrochener Strahl. Wurde nun die zweite Platte gedreht, so wurden beide Strahlen geteilt und man sah vier Bilder des dunkeln Punktes.

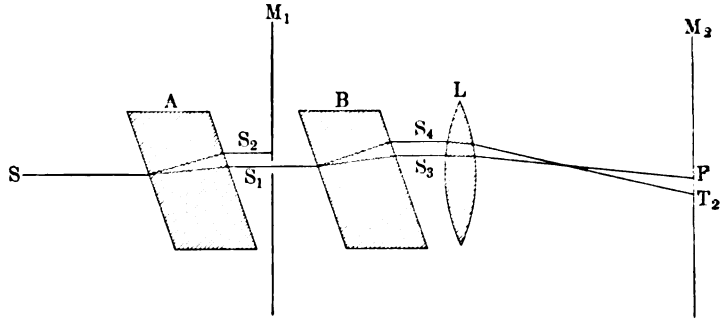
Der Versuch wird durch Fig. 386 veranschaulicht. Die beiden Kalkspatplatten befinden sich anfangs in derselben Stellung und man sieht daher nur zwei Bilder. Nun wird die obere Platte gedreht und man erblickt vier Bilder, die aber anfangs ungleich hell sind. Erst nach einer Drehung um 45° sind sie beide gleich hell. Nach einer Drehung von 90° sieht man wieder nur zwei Bilder. Dreht man weiter, so erscheinen wieder vier Bilder. Hat man die eine Platte um 180° gedreht und sind die beiden Platten gleich dick, so sieht man nur ein Bild.

§ 414. Dieser Versuch zeigt deutlich, daß das Licht, welches durch eine Kalkspatplatte hindurchgegangen ist, eigentümliche Eigenschaften angenommen

Digitized by Google

hat, die das gewöhnliche Licht nicht besitzt, denn dieses wird im Kalkspat immer doppelt gebrochen, wenn es nicht in der Richtung der optischen Achse geht (§ 395). Eine genauere Untersuchung läßt sich in folgender Weise ausführen. Ein Lichtstrahl S (Fig. 387) fällt auf eine Kalkspatplatte A, deren Hauptschnitt mit der Ebene der Zeichnung zusammenfällt, und wird in die beiden Strahlen S_1 und S_2 gespalten. Der eine dieser beiden Strahlen, S_2, wird von dem Schirm M_1 aufgefangen, während S_1 (der außergewöhnlich

Fig. 387.



Doppelbrechung im Kalkspat.

gebrochene Strahl) durch einen Spalt M_1 hindurchgeht und eine zweite Kalkspatplatte B trifft. Diese wird im allgemeinen den Strahl S_1 in die beiden Strahlen S_3 und S_4 spalten, die den Schirm M_2 in den Punkten F und T_2 treffen, nachdem sie durch die Sammellinse L hindurchgegangen sind. Wird nun B gedreht, so erleidet der Strahl S_1 in der zweiten Platte keine Doppelbrechung, wenn die Hauptschnitte beider Platten in dieselbe Ebene fallen. Wenn die beiden Hauptschnitte einen Winkel von 45° miteinander bilden, so sind die beiden Bilder gleich hell, und wenn die beiden Hauptschnitte einen rechten Winkel miteinander bilden, so wird S_1 nicht doppelt gebrochen.

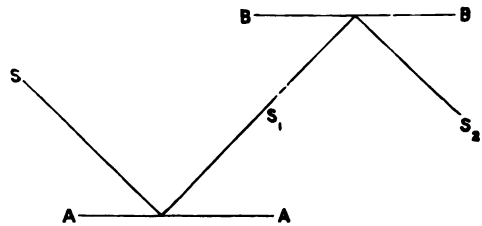
Hätte man durch den Schirm M den Strahl S_1 zurückgehalten, aber den Strahl S_2 (den gewöhnlich gebrochenen Strahl) weitergehen lassen, so würde die Kalkspatplatte auf diesen Strahl dieselbe Wirkung hervorgebracht haben. Auch in diesem Falle findet keine Doppelbrechung statt, wenn die Hauptschnitte beider Kalkspatplatten in eine Ebene fallen. Auch wenn die beiden Hauptschnitte miteinander einen rechten Winkel bilden, findet keine Doppelbrechung statt. In den Zwischenstellungen entstehen zwei Bilder, die ungleich hell sind, ausgenommen, wenn die Hauptschnitte miteinander einen Winkel von 45° bilden.

§ 415. Newton, der diese Erscheinungen kannte, hatte gesagt, das Licht erhalte bei seinem Durchgange durch den Kalkspat in verschiedenen Richtungen verschiedene Eigenschaften. Malus schloß sich dieser Auffassung an und nannte Lichtstrahlen, die durch Kalkspat gegangen sind, polarisierte Strahlen. Der gewöhnlich gebrochene Strahl ist so polarisiert, daß er

Digitized by Google

durch eine andere Kalkspatplatte außergewöhnlich gebrochen hindurchgeht, wenn der Hauptschnitt der letzteren Platte auf dem Hauptschnitt der ersteren senkrecht steht. Der außergewöhnlich gebrochene Strahl ist dagegen so polarisiert, daß er durch die andere Platte gewöhnlich gebrochen hindurchgeht, wenn die Hauptschnitte der beiden Platten aufeinander senkrecht stehen.

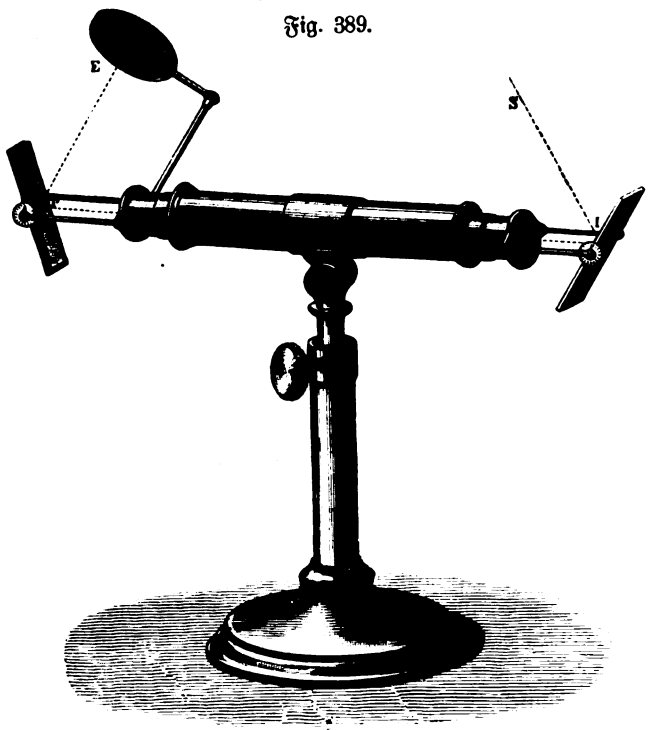
Fig. 388.



Malusscher Spiegelversuch.

Nun hatte, wie gesagt, Malus beobachtet, daß reflektiertes Licht beim Durchgang durch eine Kalkspatplatte keine Doppelbrechung erleidet, wenn sich die Platte in einer bestimmten Stellung befindet. Das Licht mußte also polarisiertes Licht sein. Das Licht erleidet demnach nicht nur beim Durchgang durch Kalkspat (oder einen anderen doppelbrechenden Kristall), sondern auch bei der Zurückwerfung die sogen. Polarisation.

Fig. 389.



Malussches Spiegelstativ.

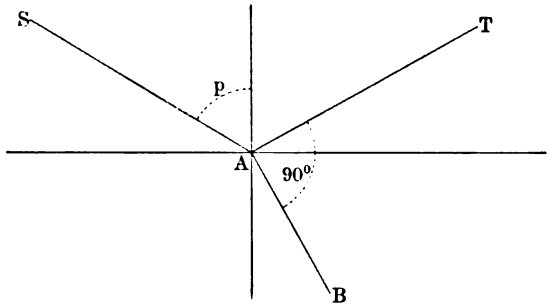
Malus führte mit dem polarisierten Licht eine Reihe sehr interessanter Versuche aus. Er ließ einen Lichtstrahl, der von einem Spiegel *A* (Fig. 388)

Digitized by Google

reflektiert und also polarisiert war, auf einen zweiten Spiegel fallen, der dem ersten parallel war, und fand, daß der Strahl von dem zweiten Spiegel in der gewöhnlichen Weise reflektiert wurde. Nun konstruierte er einen Apparat (Fig. 389), der es gestattete, den zweiten Spiegel durch Drehung in alle möglichen Lagen zu bringen. Wurde er so gestellt, daß die beiden Einfallsebenen aufeinander senkrecht standen, so wurde das Licht vom zweiten Spiegel nicht reflektiert. Wenn die beiden Einfallsebenen einen Winkel bilden, der kleiner als 90° ist, so wird der Lichtstrahl zum Teil zurückgeworfen, d. h. er verliert bei der Reflexion einen Teil seiner Helligkeit. Metallspiegel können zu diesem Versuch nicht gebraucht werden. Am besten eignen sich unbelegte Glasspiegel.

Ferner ließ Malus einen Lichtstrahl, der durch eine Kalkspatplatte hindurchgegangen war, auf einen Spiegel fallen. Wenn der Hauptschnitt der Platte senkrecht auf der Ebene des Spiegels stand, so wurde der gewöhnlich gebrochene Strahl zurückgeworfen, der außergewöhnlich gebrochene dagegen nicht. War dagegen der Hauptschnitt der Platte der Ebene des Spiegels parallel, so wurde der außergewöhnlich gebrochene Strahl zurückgeworfen, aber nicht der gewöhnlich gebrochene. Die beiden Strahlen, der gewöhnlich gebrochene und der außergewöhnlich gebrochene, sind, wie man zu sagen pflegt, senkrecht zueinander polarisiert.

Fig. 390.



Der Polarisationswinkel.

Später zeigte Malus, daß auch bei der gewöhnlichen Brechung, z. B. in Glas, der gebrochene Strahl ebenfalls polarisiert wird, und zwar senkrecht zum reflektierten Strahl. Trifft ein Lichtstrahl S eine Glasplatte (Fig. 390), so tritt er zum Teil in das Glas ein und zum Teil wird er vom Glase reflektiert. Diese beiden Strahlen, in welche der einfallende Strahl zerlegt wird, sind polarisiert, und zwar senkrecht zueinander.

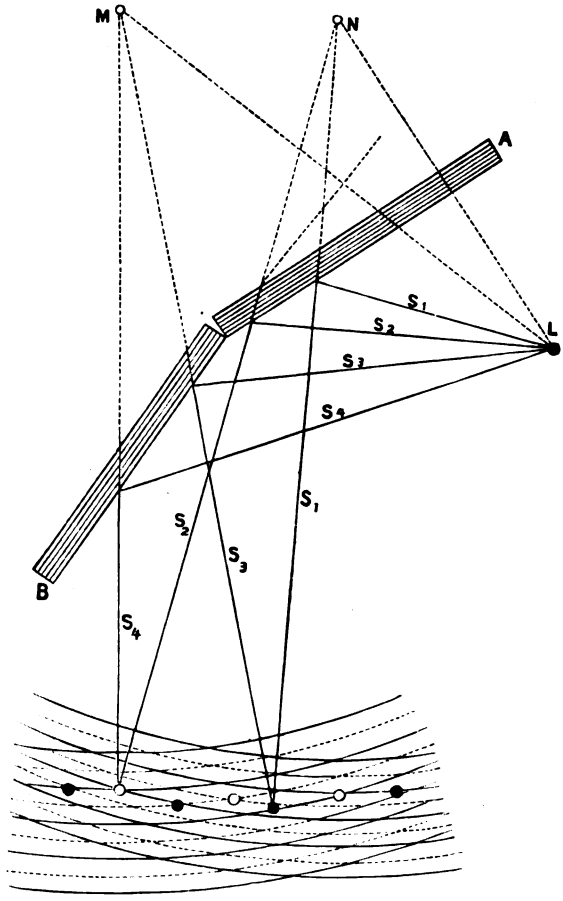
Wenn die beiden Strahlen, der zurückgeworfene und der gebrochene, vollständig polarisiert sind, so stehen sie, wie Brewster nachgewiesen hat, aufeinander senkrecht. Der einfallende Strahl SA bildet dann mit dem Einfallslot einen Winkel von bestimmter Größe, den sogen. Polarisationswinkel. Für Glas ist dieser Winkel gleich $56^1/_2{}^0$.

§ 416. Young vermochte, wie bereits erwähnt wurde, die Polarisation nicht durch die Wellentheorie zu erklären, und Malus begnügte sich mit der Erklärung Newtons, daß das Licht beim Durchgang durch Kalkspat in verschiedenen Richtungen verschiedene Eigenschaften bekomme.

Digitized by Google

Die Wellentheorie sollte erst zum vollständigen Siege über die Emissionstheorie gelangen, als der französische Physiker Augustin Jean Fresnel seine berühmten Abhandlungen veröffentlichte. Fresnel war ursprünglich ebenso wie Malus Ingenieur. Als er im Jahre 1815 infolge der politischen Umwälzung seine Stellung verlor, in die er übrigens später wieder eingesetzt wurde, warf er sich auf das Studium der Optik und wurde einer der hervorragendsten Gelehrten auf diesem Gebiete. Leider starb er schon im Jahre 1827 im Alter von nur 39 Jahren.

Fig. 391.



Fresnels Spiegelversuch.

Fresnel unterzog die Wellentheorie einer gründlichen Bearbeitung. Er ging von dem von Huygens aufgestellten Prinzip (§ 404) aus, daß jeder Punkt in einer Wellenfläche als Ausgangspunkt neuer Wellen betrachtet werden kann. Er erklärte die Beugung und nahm den in § 411 beschriebenen Versuch Youngs, der zur Ermittelung der Wellenlänge des Lichtes dienen sollte, wieder auf. Er ordnete diesen Versuch in einer so genialen Weise an, daß durch ihn der Streit über die Natur des Lichtes endgültig beigelegt wurde.

A und B (Fig. 391) sind zwei Spiegel, die zusammenstoßen und einen Winkel von nahezu 180° miteinander bilden. Das von einem leuchtenden Punkt oder besser von einer leuchtenden Linie (Spalt) ausgehende Licht wird von beiden Spiegeln reflektiert. Der Strahl S_1 z. B. wird vom Spiegel A, der Strahl S_3 vom Spiegel B zurückgeworfen. Die beiden Strahlen S_1 und S_3 treffen sich in einem bestimmten Punkte, aber sie haben von L bis zu

Digitized by Google

diesem Punkte Wege von verschiedener Länge zurückgelegt. Der Weg, den der erste Strahl zurückgelegt hat, ist so groß wie die Entfernung des Punktes N vom Kreuzungspunkt, der Weg, den der zweite Strahl zurückgelegt hat, so groß wie die Entfernung des Punktes M vom Kreuzungspunkt. N ist der Bildpunkt von L im Spiegel A, M der Bildpunkt von L im Spiegel B. Ist nun die Wegdifferenz der beiden Strahlen eine ungerade Anzahl halber Wellen-

Fig. 392.

Augustin Jean Fresnel.

längen, so vernichten sich die Strahlen. Ist sie dagegen eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen, so verstärken sich die Strahlen. Läßt man die Strahlen in das Auge eintreten, so beobachtet man eine Anzahl heller und dunkler Linien.

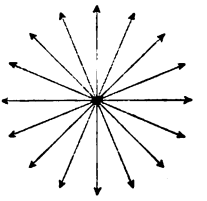
Die Wegdifferenz läßt sich, wie aus Fig. 393 leicht zu ersehen ist, leicht berechnen und die Wellenlänge mit großer Genauigkeit bestimmen. Der Versuch ist so „rein" (vergl. II, § 147), daß kaum etwas gegen denselben eingewendet werden kann. Vor dem Versuche Youngs hat er den großen Vorzug, daß die beiden interferierenden Strahlen aus derselben Lichtquelle stammen. Der Versuch findet durch die Huygenssche Wellenlehre eine sehr einfache Erklärung, während er in anderer Weise schwer zu erklären ist.

§ 417. Fresnel erkannte auch die Natur der Polarisationserscheinungen. Er fand zusammen mit Arago (§ 286), daß zwei Lichtstrahlen, die in der-

Digitized by Google

selben Ebene polarisiert sind, interferieren können, zwei Lichtstrahlen, die senkrecht zueinander polarisiert sind, dagegen nicht. Fresnel zog hieraus den Schluß, daß zwei senkrecht zueinander polarisierte Lichtstrahlen Schwingungen haben müssen, die nicht aufeinander einwirken können. — Wie sollte man sich dieses nun vorstellen? Früher hatte man angenommen, daß die Lichtschwingungen in der Richtung des Strahles vor sich gehen, ebenso wie Schallschwingungen in der Bewegungsrichtung vor sich gehen. Wenn dies aber der Fall wäre, dann müßten alle Lichtstrahlen interferieren können, ebenso wie alle „Schallstrahlen" interferieren können. — Fresnel nahm daher an, daß die Lichtschwingungen senkrecht zur Richtung des Strahles vor sich gehen, daß sie, mit anderen Worten, Transversalschwingungen (Querschwingungen) und nicht Longitudinalschwingungen (Längsschwingungen) sind. Hierbei war allerdings eine große Schwierigkeit, denn es war bekannt, daß Transversalschwingungen in festen, aber nicht in flüssigen Körpern entstehen können. Dann müßte also der Äther, in welchem die Lichtschwingungen vor sich gehen, ein fester Körper sein! Fresnels Annahme stieß auf heftigen Widerstand, aber sie ermöglichte, die Polarisation und auch die Doppelbrechung zu erklären. Die Annahme der Querschwingungen hat sich also jedenfalls als nützlich erwiesen, und wir müssen einstweilen davon absehen, uns eine genauere Vorstellung von der Natur des Äthers zu machen. Aber wir können schon jetzt mit vollem Recht behaupten, daß er ein fester Körper im gewöhnlichen Sinne des Wortes nicht ist.

Fig. 393. Fig. 394.



Gewöhnliches Licht. Polarisiertes Licht.

Die Richtung des Strahls steht auf der Ebene der Zeichnung senkrecht.

Fresnel definierte nun den Unterschied zwischen gewöhnlichem Licht und polarisiertem Licht in folgender Weise: Im gewöhnlichen Licht finden die Schwingungen in allen Richtungen senkrecht zum Strahl statt (Fig. 393), im polarisierten Licht dagegen nur in einer bestimmten Richtung senkrecht zum Strahl (Fig. 394).

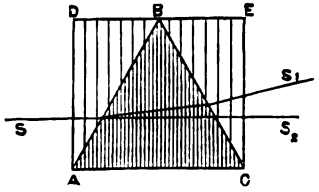
§ 418. Fresnel nahm an, wie auch früher Young getan hatte, daß die Doppelbrechung dadurch verursacht wird, daß der Äther in Kristallen in verschiedenen Richtungen ungleiche Elastizität besitzt.

Wenn eine Lichtwelle durch einen Körper hindurchgeht, so findet die Wellenbewegung im Äther statt, der in dem Körper enthalten ist. Man muß sich zwischen den Teilchen des Körpers (den Molekülen, II, § 182) Zwischenräume denken, und in diesen Zwischenräumen befindet sich der Äther. Wenn der Äther in Schwingung versetzt wird, so bleiben die Moleküle nicht unberührt davon, sondern sie kommen ebenfalls etwas in Bewegung. Hierdurch verliert die Lichtwelle an Stärke, d. h. das Licht wird zum Teil vom Körper absorbiert. Aber der Umstand, daß sich der Äther in vielen kleinen Zwischen-

Digitized by Google

räumen befindet, bewirkt zugleich, daß die Wellenbewegung in dem Körper nicht ebenso schnell fortschreitet wie in der Luft. Die Geschwindigkeit des Lichtes ist in festen und flüssigen Körpern geringer als in luftförmigen (§ 288). In gewissen festen Körpern, die wie die Flüssigkeiten in allen Richtungen dieselben Eigenschaften haben, schreitet die schwingende Bewegung des Äthers, d. h. die Lichtwelle, in allen Richtungen gleichmäßig fort. Diese Körper verhalten sich wie Glas und brechen das Licht nicht doppelt. Man nennt sie isotrop. Es gibt aber andere Körper, die in verschiedenen Richtungen verschiedene Eigenschaften haben. Es sind dies die Kristalle, welche nicht dem regulären System angehören. Zu diesen Körpern gehört der Kalkspat. Die Verschiedenheit der Eigenschaften in verschiedenen Richtungen rührt von der Form der Moleküle her, aus denen diese Kristalle bestehen. Die Moleküle haben, wie man annimmt, dieselbe Gestalt wie die Kristalle selbst, die um Achsen von ungleicher Länge aufgebaut sind. Es liegt sehr nahe, sich vorzustellen, daß in diesen Kristallen in den den Achsen entsprechenden Richtungen eine verschiedene Spannung herrscht und daß infolgedessen der Äther in verschiedenen Richtungen ungleiche Elastizität bekommt.

Fig. 395.



Doppelbrechung in Glas, auf das ein Druck ausgeübt wird.

Dies hat die Doppelbrechung zur Folge. Die Welle eines einfallenden Lichtstrahls zerfällt in zwei Wellen. Die Schwingungen der einen erfolgen in der Richtung, in welcher die Elastizität des Äthers am größten ist, die Schwingungen der anderen in der Richtung, in welcher die Elastizität des Äthers am kleinsten ist. Nur wenn der Lichtstrahl in der Richtung der optischen Achse fortschreitet, findet keine Doppelbrechung statt, da die Schwingungen in diesem Falle in einer Ebene vor sich gehen, die auf der Achse senkrecht steht. In dieser Ebene hat aber der Äther überall dieselbe Elastizität.

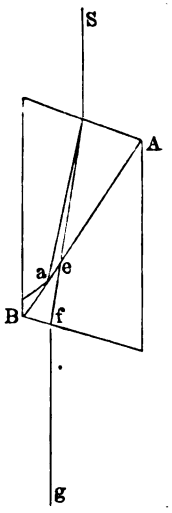
Fresnel zeigte, daß Glas doppelbrechend wird, wenn es in einer einzelnen Richtung einem Druck unterworfen wird. Das Prisma ABC (Fig. 395) befindet sich unter einem starken Druck, der auf die Flächen AC und DE ausgeübt wird. Das mittlere Prisma ist durch die beiden seitlichen Prismen ABD und CEB achromatisch gemacht. Der Strahl S wird doppelt gebrochen und zerfällt in die beiden Strahlen S_1 und S_2. Dieser Versuch bestätigt die Annahme, daß die Doppelbrechung dadurch verursacht wird, daß der Äther in verschiedenen Richtungen ungleiche Elastizität hat. In dem Glasprisma ABC herrscht nämlich zwischen den Teilchen des Glases in der Richtung des Druckes eine größere Spannung, als senkrecht zu dieser Richtung.

§ 419. Mit Hilfe einer doppelbrechenden Kristallplatte kann man sich einen Lichtstrahl verschaffen, dessen Schwingungen in einer einzigen Ebene liegen. Zu diesem Zwecke muß man von den beiden Strahlen, in die ein

Digitized by Google

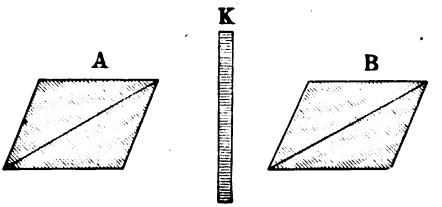
gewöhnlicher Lichtstrahl durch ein Kalkspatprisma zerlegt wird, den einen am weiteren Fortschreiten verhindern. Dies erreichte der englische Physiker William Nicol (gest. 1851) dadurch, daß er zwei Prismen vereinigte, die man dadurch erhält, daß man ein Kalkspatprisma in der durch Fig. 396 veranschaulichten Weise in zwei Prismen zerschneidet und diese mit den polierten Schnittflächen wieder (mit Kanadabalsam) zusammenkittet. Anstelle

Fig. 396.



Nicolsches Prisma.

Fig. 397.



Drehung der Schwingungsebene.

der Endflächen, die mit den vertikalen Kanten Winkel von 71° bilden, werden neue Flächen angeschliffen, die mit den Kanten Winkel von 68° bilden. Ein Lichtstrahl, welcher die obere Fläche trifft, wird durch das Prisma in zwei Strahlen, den gewöhnlich gebrochenen und den außergewöhnlich gebrochenen, zerlegt. Der letztere geht durch die Balsamschicht in das andere Prisma über und tritt in der Richtung *fg* aus. Die Richtung des austretenden Strahls ist dieselbe wie die des eintretenden. Der gewöhnlich gebrochene Strahl dagegen kommt an der Grenzfläche zwischen dem ersten Kalkspatprisma und der Balsamschicht unter einem solchen Winkel an, daß er im Punkt *a* vollständig zurückgeworfen wird.

§ 420. Stellt man zwei solche Nicolsche Prismen *A* und *B* einander gegenüber (Fig. 397), so wird ein Lichtstrahl, der das Prisma *A* durchlaufen hat, nur dann in das Prisma *B* eintreten können, wenn die Hauptschnitte der beiden Prismen zusammenfallen. Steht dagegen der eine Hauptschnitt senkrecht auf dem anderen, so kann der Strahl nicht in das Prisma *B* eintreten (vergl. § 413). Nicol machte nun die Entdeckung, daß doch etwas Licht eintritt, wenn man eine Quarzplatte zwischen die beiden Prismen stellt. Dies bedeutet aber offenbar, daß die Schwingungsebene des aus dem ersten Prisma austretenden polarisierten Strahls beim Durchgang durch die Quarzplatte eine Drehung erleidet, denn solange die Schwingungen in der durch *A* bestimmten Schwingungsebene fortschreiten, können sie nicht in das zweite Prisma eintreten. Eine solche Drehung der Schwingungsebene wird durch zahlreiche Substanzen, u. a. auch durch die Zuckerlösung bewirkt, und man kann aus der Größe der Drehung auf die Menge des gelösten Zuckers schließen.

Digitized by Google

Eine Glasplatte bewirkt unter gewöhnlichen Umständen keine Drehung. Im Jahre 1845 machte Faraday eine sehr merkwürdige Beobachtung über die Drehung der Schwingungsebene. Er brachte zwischen zwei Nicolschen Prismen eine Glasplatte an, die sich zwischen den Polen eines kräftig wirkenden Elektromagneten befand, und es zeigte sich, daß das Glas unter dem Einfluß des Magnetismus die Eigenschaft annahm, die Schwingungsebene des polarisierten Lichtstrahls zu drehen. Faraday hatte also einen Zusammenhang zwischen Magnetismus und Licht entdeckt.

Digitized by Google

Die Spektralanalyse.

Digitized by Google

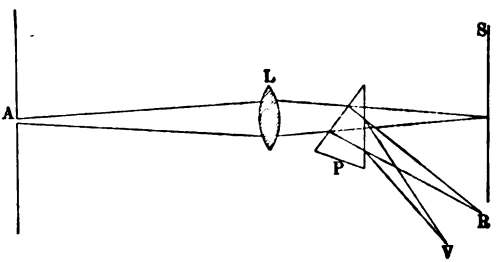
Digitized by Google

Die Spektralanalyse.

§ 421. Die Farben eines Spektrums, welches man erhält, wenn man ein Bündel Sonnenstrahlen durch ein Prisma gehen läßt, sind nicht rein (vergl. § 382). Die einzelnen Farben überdecken sich und es entstehen Mischfarben.

Newton erkannte, daß es sehr wünschenswert sei, ein reines Spektrum herzustellen, in welchem sich die Farben nicht überdecken. Im reinen Spektrum kann man nämlich sehen, ob alle Farbenübergänge von Rot bis Violett anwesend sind oder ob vielleicht einige derselben fehlen. Die Farben können in einem reinen Spektrum viel feiner und gründlicher untersucht werden als in einem „unreinen" Spektrum. Newton suchte die reinen Farben in folgender Weise zu erzeugen. Durch einen schmalen, vertikalen Spalt A (Fig. 398) tritt Sonnenlicht in ein dunkles Zimmer ein. Die Linse L würde auf dem Schirm S ein scharfes und deutliches Bild des Spaltes A erzeugen, wenn die Strahlen ungehindert weitergingen. Allein hinter der Linse steht das Prisma P, welches das Licht ablenkt und zerstreut. Die roten Strahlen kommen in R, die violetten in V, die übrigen zwischen R und V zusammen. Wenn der Spalt hinreichend schmal ist, so wird das Bild jedes einzelnen Farbenstrahls eine Linie, d. h. das Spektrum wird rein.

Fig. 398.



Newtons reines Spektrum.

§ 422. Newton hatte eine Ahnung davon, daß das reine Spektrum in der Physik der Zukunft eine Rolle spielen werde. Er schreibt nämlich: „Wenn Jemand diese Dinge mit Fleiß und Sorgfalt untersuchen wird, so ist es gewiß, daß seine Arbeit nicht ohne reiche Frucht bleiben wird."

Die Entwickelung der Physik hat die Vermutung Newtons bestätigt. Wir wissen bereits, daß Newtons Erklärung der Entstehung der Farben

Digitized by Google

durch die Zerstreuung des Lichtes (§ 383) die Herstellung achromatischer Linsen ermöglichte, was eine bedeutende Verbesserung des Fernrohrs und des Mikroskops zur Folge hatte. Aber die eingehende Untersuchung des reinen Spektrums hat zu einer ganz neuen Wissenschaft geführt, welche es ermöglicht, aus der Beschaffenheit der Lichtstrahlen einen Schluß auf die Natur der Lichtquelle zu ziehen, welche die Strahlen aussendet.

§ 423. Im Jahre 1802 veröffentlichte der englische Physiker William Wollaston (1766 bis 1828) eine Abhandlung über das Brechungsvermögen und die Farbenzerstreuung verschiedener Körper. In dieser Abhandlung teilte er mit, daß das Sonnenspektrum kein ununterbrochenes Bild aller Farben vom Rot bis Violett ist, sondern daß es durch mehrere dunkle Linien unterbrochen ist, die mit dem Spalt parallel laufen, der das Licht (durch die

Fig. 399.

Joseph Fraunhofer.

Linse *L*) nach dem Prisma sendet (Fig. 398). Dasselbe beobachtete er in den Spektren, die durch verschiedene glühende Körper erzeugt wurden. Auch hier war das Spektrum kein ununterbrochenes, sondern es bestand aus hellen Banden mit dunkeln Zwischenräumen.

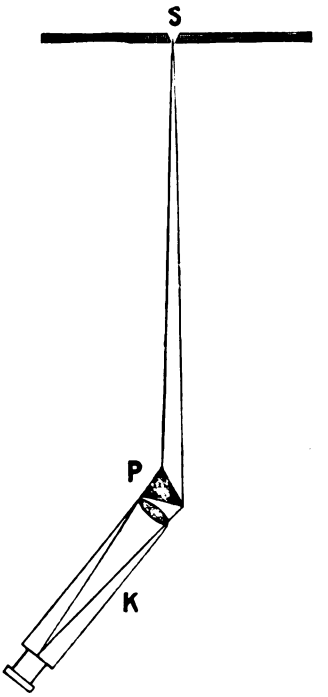
§ 424. Wollaston konnte die Entstehung der dunkeln Linien nicht erklären. Genauer untersucht wurde die Erscheinung von Joseph Fraunhofer. Er war 1787 in Straubing geboren, wo sein Vater Glasermeister

Digitized by Google

war. Nach dem Tode seiner Eltern kam er im Alter von 11 Jahren zum Glasschleifer Weichselberger in München in die Lehre. Die Lehrzeit sollte sechs Jahre dauern, und sein Lehrherr nahm ihn so in Anspruch, daß er nicht einmal die Sonntagsschule besuchen konnte. Ein Unfall, der ihm zustieß, bildete die Veranlassung, daß sich seine Verhältnisse besserten.

Das Haus seines Lehrherrn stürzte nämlich zusammen und der junge Fraunhofer wurde unter den Trümmern begraben. Als man damit beschäftigt war, ihn auszugraben, kam der Kronprinz an die Unglücksstätte. Dieser nahm sich des Knaben an und beschenkte ihn mit einer größeren Summe Geldes. Fraunhofer kaufte sich jetzt von seinem Lehrherrn frei und schaffte sich eine Glasschleifmaschine an, um auf eigene Hand arbeiten zu können. Da er jedoch keine hinreichende Beschäftigung fand, trat er als Gehilfe in die mechanische Werkstatt von Utzschneider ein. Hier machte er sich bald als ein außergewöhnlich tüchtiger Glasschleifer geltend. Seine erste Aufgabe war, Linsen für die Sternwarte in Ofen zu schleifen. Diese und mehrere andere Arbeiten gelangen so vorzüglich, daß Utzschneider 1809 den jungen Fraunhofer als Kompagnon in sein optisches Institut aufnahm.

Fig. 400.



Fraunhofers Untersuchung des Sonnenspektrums.

Fraunhofer hatte nun Gelegenheit, sich auszubilden. Er studierte Mathematik und namentlich Optik. Für die Herstellung möglichst vollkommener achromatischer Linsen suchte er Anhaltspunkte im Spektrum, um die Farbenzerstreuung der verschiedenen Glassorten möglichst genau bestimmen zu können. Newtons Einteilung des Spektrums setzte voraus, daß die Länge desselben genau bestimmt werden könne, allein Fraunhofer fand, daß es unmöglich sei, für das Spektrum bestimmte Grenzen anzugeben. Er suchte daher Lichtquellen zu finden, die nur eine Art von farbigen Strahlen, also monochromatisches Licht, aussenden. Für derartige Lichtquellen mußte das Spektrum aus einer einzigen Linie bestehen. Hätte er z. B. ein einfaches gelbes und ein einfaches blaues Licht gefunden, so hätte er die Größe der Brechung dieser Farbenstrahlen durch den Versuch ermitteln können. Er fand jedoch keine derartigen Lichtquellen, dagegen entdeckte er, daß im Spektrum einer Öllamme und einer Spiritusflamme immer an derselben Stelle eine deutliche gelbe Linie vorhanden ist. In dieser gelben Linie hatte er nun einen

Digitized by Google

feſten Anhaltspunkt. Um die Größe der Zerſtreuung beſtimmen zu können, bedurfte er aber mehrerer ſolcher Linien. Er ſetzte daher ſeine Unterſuchungen fort und ſtudierte unter anderem auch eingehend das Spektrum des Sonnenlichtes. Er benutzte bei ſeinen Beobachtungen ein Vergrößerungsglas und erreichte genauere Reſultate, als irgend ein früherer Beobachter erreichen konnte.

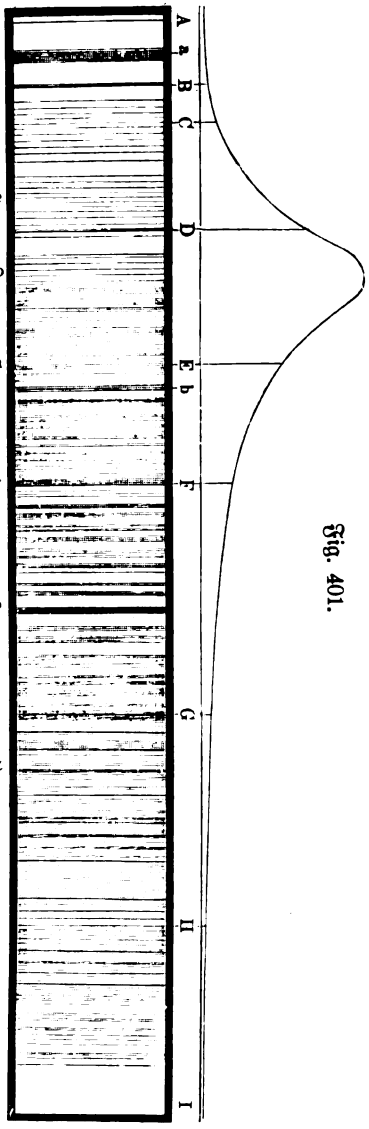


Fig. 401.

Die Fraunhoferſchen Linien.

Er ließ das Sonnenlicht durch einen ſchmalen Spalt *S* (Fig. 400) in ein dunkles Zimmer eintreten und hier auf ein Prisma *P* fallen. Die aus dem Prisma austretenden Strahlen ließ er in ein Fernrohr *K* eintreten. Die Objektivlinſe erzeugt im Geſichtsfelde ein reines Spektrum und dies wird durch die Okularlinſe, die ja als Vergrößerungsglas wirkt, betrachtet.

Das Fernrohr muß ſo eingeſtellt ſein, daß man ein ſcharfes Bild des Spaltes erblickt, wenn man es auf dieſen richtet. Wenn nun das gebrochene Licht in das Fernrohr eintritt, ſo würde man, wenn alle Strahlen gleich ſtark gebrochen würden, nur ein einziges linienförmiges Bild des Spaltes ſehen. Das Sonnenlicht beſteht aber aus Strahlen von verſchiedener Brechbarkeit, und jede Farbe erzeugt ihr beſonderes Bild des Spaltes. Es entſteht alſo ein reines Spektrum.

Fraunhofer gab die nebenſtehende Zeichnung (Fig. 401) des vergrößerten Spektrums, welches er in ſeinem Fernrohr erblickte. In dieſem fand er die Anhaltspunkte, welche er ſuchte, in reicher Fülle. Das Spektrum war nämlich durch ſenkrechte dunkle Linien in eine Menge ungleich breiter Streifen geteilt, und die dunkeln Linien fand er bei wiederholter Beobachtung ſtets an denſelben Stellen. Sie ſind charakteriſtiſch für das Sonnenlicht.

Digitized by Google

Die Anwesenheit der dunkeln Linien im Sonnenspektrum bedeutet offenbar, daß gewisse Farbenstrahlen im Sonnenlicht fehlen. Enthielte es nämlich alle Übergangsfarben vom äußersten Rot bis zum äußersten Violett, so würde das Spektrum ein ununterbrochenes (kontinuierliches) sein.

Einige dieser Fraunhoferschen Linien, wie die dunkeln Linien des Sonnenspektrums nach ihrem Entdecker genannt werden, sind bedeutend breiter als die anderen. Zu diesen gehören namentlich acht Linien, die mit den Buchstaben *A, B, C, D, E, F, G, H* bezeichnet werden. Fraunhofer zählte über 500 Linien.

Nun hatte Fraunhofer ein ausgezeichnetes Hilfsmittel für die Anfertigung achromatischer Linsen, indem er die Brechungsexponenten für zwei dieser Linien in den verschiedenen Glassorten messen und aus diesen die Krümmungsradien der Linsen berechnen konnte.

§ 425. Es ist selbstverständlich, daß die dunkeln Linien des Spektrums ihren Entdecker Fraunhofer im höchsten Grade interessierten. Er überzeugte sich, daß sie nicht durch Beugung des Lichtes verursacht wurden. Dann untersuchte er das Licht anderer Himmelskörper und fand, daß das Spektrum des Mondlichtes und des Planetenlichtes dieselben dunkeln Linien enthält wie das Sonnenspektrum, während das Spektrum des Fixsternlichtes vom Spektrum des Sonnenlichtes verschieden war. Hieraus ging deutlich hervor, daß die dunkeln Linien eine Eigentümlichkeit des Sonnenlichtes bildeten, einerlei ob es uns direkt erreicht oder von der Oberfläche eines Planeten zurückgeworfen wird.

In denselben Abhandlungen (aus den Jahren 1814 und 1815) teilte Fraunhofer noch eine andere wichtige Beobachtung mit, nämlich die, daß die helle Linie, die er im Spektrum der Ölflamme bemerkt hatte, genau an derselben Stelle liegt, wo im Sonnenspektrum die dunkle Linie *D* liegt.

Die Abhandlungen Fraunhofers wurden in den Kreisen der Physiker wenig beachtet und riefen keine weiteren Untersuchungen über das Spektrum hervor. Er setzte indessen seine Arbeiten fort, nachdem das optische Institut 1818 von Benediktbeuren nach München verlegt worden war, wo er mit dem Professortitel ausgezeichnet und zum Mitglied der Akademie ernannt wurde.

Den Hauptgegenstand seiner Untersuchungen bildeten immer die dunkeln Linien des Sonnenspektrums. Zur Erzeugung des Spektrums bediente er sich nicht nur des Prismas, sondern auch des sogenannten Gitters.

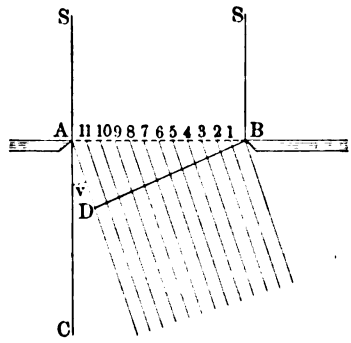
§ 426. Wir haben früher gesehen (§ 411), daß ein Spektrum durch Beugung des Lichtes entstehen kann.

Auf einen engen Spalt *AB*, der in Fig. 402 stark vergrößert ist, fällt ein Bündel einfarbiger Lichtstrahlen *SS*. Im Spalt selbst, also in der Linie *AB*, sind die einzelnen Strahlen in demselben Schwingungszustande, und von jedem Punkt in *AB* gehen nach dem Huygensschen Prinzip neue Lichtwellen aus. Wenn nun der Schirm, auf den das Licht fällt, so weit vom Spalt entfernt ist, daß alle Linien von *AB* nach dem Schirm als parallel an-

Digitized by Google

gesehen werden können, so muß offenbar diejenige Stelle des Schirmes, die dem Spalt direkt gegenüberliegt, von Licht in gleichem Schwingungszustande getroffen und daher stark beleuchtet werden. — Anders ist es jedoch an denjenigen Stellen, die von Lichtstrahlen getroffen werden, die von der ursprünglichen Richtung abgelenkt (gebeugt) sind. Diejenigen Strahlen z. B., die mit der ursprünglichen Strahlenrichtung SAC den Winkel v bilden, haben vom Spalt bis zum Schirm ungleich lange Wege zurückzulegen. Wir wollen unsere Aufmerksamkeit auf eine bestimmte Anzahl von Strahlen richten, die in der Figur mit den Zahlen 1 bis 12 bezeichnet sind. Die Wegdifferenz der beiden Randstrahlen, d. h. die Strecke AD, sei eine ganze Wellenlänge. In diesem Fall hat der mittlere Strahl, der mit 6 bezeichnet ist, eine halbe Wellenlänge weiter zurückzulegen als der Randstrahl bei B. Wenn dann der letztere auf dem Schirm einen Wellenberg hervorruft, ruft der Strahl 6 ein Wellental hervor. Die Wirkungen der beiden Strahlen heben sich also gegenseitig auf. Ebenso vernichten sich paarweise die Strahlen 1 und 7, 2 und 8, 3 und 9, 4 und 10, 5 und 11. Das ganze Lichtbündel wird also infolge der Interferenz der einzelnen Strahlen auf dem Schirm keine Wirkung hervorbringen.

Fig. 402.



Interferenz durch einen Spalt.

Ist für die Randstrahlen eines Bündels, welches noch mehr von der ursprünglichen Richtung abweicht, die Wegdifferenz gleich zwei ganzen Wellenlängen, so ist die Wegdifferenz zwischen dem einen Randstrahl und dem mittleren Strahl, ebenso die Wegdifferenz zwischen diesem und dem anderen Randstrahl gleich einer Wellenlänge. Die Strahlen jeder Hälfte heben also ihre Wirkung gegenseitig auf. Dasselbe findet statt, wenn die Wegdifferenz der Randstrahlen 3, 4, 5, u. s. w. ganze Wellenlängen beträgt. — In denjenigen Richtungen, die diesen Differenzen entsprechen, kommt also kein Licht auf den Schirm. An den betreffenden Stellen entstehen dunkle Linien. Wenn dagegen die Wegdifferenz der Randstrahlen gleich 1, 3, 5, 7, u. s. w. halben Wellenlängen ist, so kommt in diesen Richtungen immer etwas Licht auf den Schirm und es entstehen an den betreffenden Stellen helle Linien. Das entstehende Interferenzbild besteht aus einer hellen Linie in der Mitte und einer Anzahl heller und dunkler Streifen auf beiden Seiten der mittleren Linie (Fig. 403).

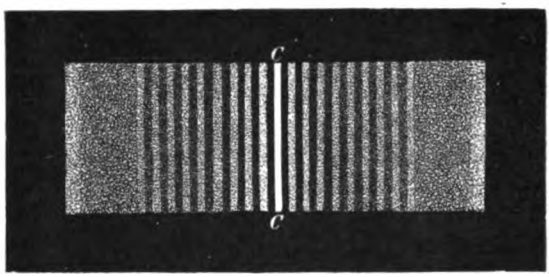
Mißt man den Abstand zweier aufeinander folgender dunkler Streifen und ermittelt den Winkel, um den das Lichtbündel von der ursprünglichen Richtung abweicht, so ist die Berechnung der Wellenlänge des zur Ausführung des Versuches benutzten einfarbigen Lichtes eine einfache geometrische Aufgabe. Der Unterschied der Wege vom Spalt bis zu den den betreffenden

Digitized by Google

Strahlen entsprechenden dunkeln Streifen auf dem Schirm muß nämlich eine ganze Wellenlänge sein.

Wird der Versuch nicht mit einfarbigem, sondern mit weißem Licht ausgeführt, so besteht das Interferenzbild nicht aus hellen und dunkeln, sondern aus farbigen Streifen. Die Strahlen von verschiedener Farbe erzeugen nämlich ihre hellen und dunkeln Streifen in ungleichen Abständen vom mittleren Streifen, der auch hier weiß ist, da er von allen Farben gebildet wird. Der erste helle Streifen nächst dem mittleren ist violett, weil das violette

Fig. 403.

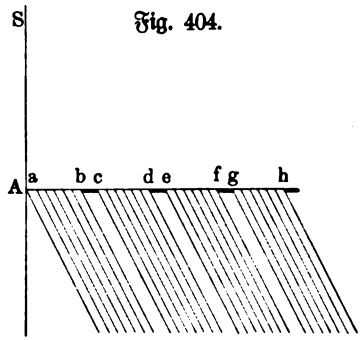


Interferenzbild.

Licht die kleinste Wellenlänge hat. Auf diesen folgen dann die übrigen Streifen in der Reihenfolge der Regenbogenfarben. Die Farben sind jedoch nicht rein, da sie sich in größerer Entfernung vom Mittelstreifen mehr und mehr miteinander vermischen.

§ 427. Fraunhofer verbesserte dieses Beugungsspektrum durch Einführung des sogenannten Gitters, welches er dadurch herstellte, daß er Metalldrähte über die Windungen zweier paralleler Schrauben legte. Man kann sie auch dadurch herstellen, daß man in die Metallbelegung einer vergoldeten oder versilberten Glasplatte feine Linien einritzt. Am meisten in Gebrauch sind Gitter, die dadurch hergestellt werden, daß man in eine Glasplatte mit einem feinen Diamantsplitter parallele Linien einritzt. Die Zwischenräume zwischen je zwei eingeritzten Linien sind die Spalte. Läßt man nun einen Lichtstrahl senkrecht durch ein Gitter gehen, so bildet jeder Spalt den Ausgangspunkt für neue Lichtwellen.

Fig. 404.



Interferenzgitter.

Fig. 404 stellt einen Teil eines solchen Gitters vor. Der erste von etwa 1000 Spalten ist *ab*, der zweite *cd*, u. s. w. Das durchgehende Licht, welches die ursprüngliche Richtung beibehält, wird von einer Linie gesammelt und erzeugt auf einem Schirm einen hellen Streifen.

Digitized by Google

Die Lichtstrahlen dagegen, welche in schiefer Richtung durch das Gitter gehen, haben gegeneinander eine Wegdifferenz. Ist z. B. diese Differenz für die durch den ersten und durch den zweiten Spalt gehenden Strahlen $^1/_{1000}$ Wellenlänge, so ist überhaupt für je zwei benachbarte Spalte die Wegdifferenz $^1/_{1000}$ Wellenlänge. Die Strahlen, welche durch den Spalt 501 gehen, haben also einen Weg zurückzulegen, der um $^{500}/_{1000}$ Wellenlängen länger ist, als der Weg, den die aus dem Spalt 1 austretenden Strahlen zurücklegen. Die Strahlen heben also ihre Wirkung gegenseitig auf. Dasselbe tun die aus den Spalten 2 und 502, 3 und 503 u. s. w. austretenden Strahlen. Also wird das Licht, welches in der betreffenden Richtung aus den ersten 500 Spalten kommt, durch das Licht vernichtet, welches aus den nächsten 500 Spalten kommt. — Wenn das Gitter eine hinreichende Anzahl von Spalten hat, so wird das Licht überall vernichtet, ausgenommen an denjenigen Stellen, an denen die Strahlen zweier benachbarter Spalte eine Wegdifferenz von einer Anzahl ganzer Wellenlängen haben.

Da, wo die Wegdifferenz für die Strahlen zweier benachbarter Spalte 1, 2, 3, u. s. w. (eine ganze Anzahl) Wellenlängen ist, verstärken sich die Strahlenbündel sämtlicher Spalte. In den betreffenden Richtungen müssen also helle Linien entstehen.

Ein Gitter erzeugt also ebenso wie ein einzelner Spalt ein Interferenzbild mit hellen und dunkeln Linien, aber das Bild ist bedeutend heller als das Bild eines einzelnen Spaltes.

Verwendet man weißes Licht zur Ausführung des Gitterversuches, so erhält man statt heller und dunkler Streifen ein Spektrum, dessen violettes Ende dem Mittelstreifen zugewendet ist. Ein Gitter erzeugt nicht nur ein Spektrum auf jeder Seite des Mittelstreifens, sondern in weiterer Entfernung von diesem noch mehrere andere, von denen jedes folgende lichtschwächer ist als das vorhergehende.

§ 428. Fraunhofer fand im Gitterspektrum des Sonnenlichtes die dunkeln Linien in derselben Reihenfolge und mit derselben relativen Deutlichkeit wieder wie im Prismenspektrum. Er bestimmte die Wellenlängen der verschiedenen Farben, wobei ihm die dunkeln Linien als Anhaltspunkte dienten. Die Messungen Fraunhofers sind viel wertvoller und genauer als die Messungen Youngs und Newtons, da den letzteren das Hilfsmittel der dunkeln Linien nicht zur Verfügung stand.

Es war nicht die mathematische Seite der Sache, für die sich Fraunhofer interessierte, und es war nicht seine Aufgabe, sich in den Streit über die Natur des Lichtes einzumischen. Er beschränkte sich einfach darauf, die Tatsachen durch Versuche festzustellen. Eine mathematische Behandlung erfuhren seine Arbeiten später durch F. M. Schwerd (1792 bis 1871), Professor am Gymnasium zu Speyer, und infolge dieser Behandlung wurden die Gitterversuche zu einer neuen Bestätigung der Wellentheorie. Als das Werk von Schwerd erschien (1835), war Fraunhofer längst gestorben, da er nur ein Alter von 39 Jahren erreicht hat. Die Entwickelung der Optik hat er

Digitized by Google

in hohem Grade gefördert. Vor allen Dingen sind seine Verbesserungen der optischen Instrumente durch Berechnen und Schleifen der achromatischen Linsen hervorzuheben. Mit Recht wurde auf seinen Grabstein die Inschrift gesetzt: „Er brachte uns die Sterne näher." Und wir können heute hinzufügen: „Er setzte uns in den Stand, die Natur der Lichtquelle aus dem Licht zu erkennen, welches sie aussendet."

Die Fraunhoferschen Linien, sowie die Beobachtung der gelben Linie in der Spiritusflamme wurden die Vorläufer einer ganz neuen Wissenschaft, der Spektralanalyse.

§ 429. Die Spiritusflamme ist an und für sich farblos, aber sie besitzt in der Regel eine gelbliche Farbe. Auf diese Erscheinung hatte Thomas Melville bereits im Jahre 1752 in einer in Edinburg erscheinenden Zeitschrift hingewiesen. Die Ursache der gelben Färbung vermochte er jedoch nicht anzugeben.

Gleichzeitig mit Fraunhofer beschäftigte sich John Herschel (§ 327) mit der Untersuchung der Spektra farbiger Flammen. Seine Beobachtungen, deren Ergebnisse er 1823 und 1829 veröffentlichte, erstreckten sich namentlich auf Flammen, die durch Strontium, Kupfer oder Borsäure gefärbt waren.

„Die Flamme mit salpetersaurem Strontian hat zwei helle, rote Strahlen. Das Spektrum hat sehr scharfe Grenzen, und das merkwürdigste bei demselben ist eine helle, violette Linie, die von den übrigen ganz verschieden ist. — Kalium gibt auch, wenn es in Joddampf brennt, ein eigentümliches Spektrum." Er hebt hervor, daß man auf diesem Wege äußerst kleine Mengen derjenigen Stoffe nachweisen kann, welche die Flamme färben. Aber das Licht derselben muß durch ein Prisma gesandt werden, da man bei direkter Beobachtung die Färbung der Flamme nicht hinreichend deutlich erkennen kann.

Klarer spricht sich über diese Verhältnisse Fox Talbot (1800 bis 1877), der Erfinder der Photographie auf Papier, aus. Er schrieb 1834 über Spektraluntersuchungen, die er seit 1826 angestellt hatte, und hebt hervor, daß man eine Strontiumflamme und eine Lithiumflamme, d. h. Flammen, die mit Strontium oder Lithium gefärbt sind, nicht mit dem bloßen Auge unterscheiden kann, da sie beide rot sind. Betrachtet man aber eine Strontiumflamme durch ein Prisma, so bemerkt man außer einem rotgelben und einem scharfen hellblauen Strahl eine große Anzahl roter Strahlen, die alle durch dunkle Zwischenräume getrennt sind. In der Lithiumflamme dagegen sind die roten Strahlen nicht getrennt. Talbot fügt hinzu, daß man durch Beobachtung des Spektrums ungeheuer kleine Mengen dieser Stoffe entdecken kann, ja daß diese Art der Untersuchung viel feiner ist, als die chemische Prüfung auf die Anwesenheit dieser Stoffe. Talbot unterließ es jedoch, allgemeine Schlüsse aus seinen Studien zu ziehen. Dasselbe gilt von W. A. Millers (1817 bis 1870), der 1845 Beobachtungen über die Flammenspektra veröffentlichte. Er gab zwar seiner Abhandlung Abbildungen der von ihm beobachteten Spektra bei, aber er kam doch nicht zu einer klaren Auffassung der Spektralerscheinungen.

Digitized by Google

Einen wesentlichen Fortschritt in dieser Richtung bilden die Arbeiten von William Swan (geb. 1818), die im Jahre 1857 veröffentlicht wurden. Er wies nach, daß die helle gelbe Linie im Spektrum der Spiritusflamme, die bereits Fraunhofer benutzt hatte und die fast niemals im Spektrum der Ölflamme fehlt, durch das Metall Natrium hervorgebracht wird, welches mit Chlor verbunden das Kochsalz bildet. Der Grund, daß fast alle Flammen die Natriumlinie zeigen, hat seinen Grund in der allgemeinen Verbreitung dieses Körpers. In jedem Wasser und in jedem Staub sind größere oder kleinere Mengen dieser Verbindung enthalten.

Fig. 405.

G. R. Kirchhoff.

Diese gelbe Linie findet sich, wie bereits erwähnt wurde, stets an derselben Stelle im Spektrum. Natrium in der Flamme gibt also immer eine bestimmte Spektrallinie. Swan untersuchte auch andere Flammen und kam zu ähnlichen Ergebnissen, nämlich, daß die Spektrallinien, welche auftreten, wenn ein Stoff in der Flamme erhitzt wird, stets an derselben Stelle des Spektrums liegen. Jede Substanz besitzt ihre bestimmten Linien, die für sie charakteristisch sind. — Deutlich ausgesprochen wurde jedoch dieses Gesetz erst von Kirchhoff und Bunsen. Swan behandelt den Gegenstand nicht allgemein, läßt auch die Frage unerörtert, in welchem Grade die festen und die gasförmigen Körper an der Erzeugung der Spektra beteiligt sind.

Digitized by Google

§ 430. Gustav Robert Kirchhoff war 1824 in Königsberg geboren. Er begann sein Studium auf der Universität seiner Vaterstadt, wo der berühmte Professor der mathematischen Physik Franz Neumann (1798 bis 1895) zu seinen Lehrern gehörte. Sämtliche Arbeiten Kirchhoffs lassen in der eleganten mathematischen Darstellung der physikalischen Untersuchungen den Einfluß Neumanns erkennen. Im Jahre 1838 wurde er Privatdozent an der Universität in Berlin, 1850 Professor in Breslau und 1854 Professor in Heidelberg. In Breslau war er ein Jahr lang mit Bunsen zusammen tätig gewesen, der bereits 1852 nach Heidelberg übergesiedelt war.

Fig. 406.

R. W. Bunsen.

Robert Wilhelm Bunsen war 1811 in Göttingen geboren. Hier habilitierte er sich 1833 als Privatdozent, wurde 1836 Professor an der Polytechnischen Schule in Kassel, 1838 Professor in Marburg. Von hier ging er 1851 nach Breslau. Bereits im folgenden Jahre folgte er einem Rufe nach Heidelberg.

Während Kirchhoff in Heidelberg wirkte, gehörte er bereits zu den berühmtesten Dozenten Europas. Seine Vorlesungen, in denen eine über-

Digitized by Google

legene Beherrschung des Stoffes zum Ausdruck kam, und die von eleganten und präzis ausgeführten Experimenten begleitet waren, zogen Zuhörer aus allen Ländern nach Heidelberg. Im Jahre 1859, also zwei Jahre nach dem Erscheinen von Swans Arbeiten, veröffentlichte er in den Monatsberichten der Berliner Akademie eine Abhandlung über die Fraunhoferschen Linien, durch die er den Grund zur wissenschaftlichen Spektralanalyse legte. Die Abhandlung umfaßte nur zwei Oktavseiten und hatte in ihren wesentlichen Teilen den folgenden Wortlaut.

§ 431. „Bei Gelegenheit einer von Bunsen und mir in Gemeinschaft ausgeführten Untersuchung über die Spektren farbiger Flammen, durch welche es uns möglich geworden ist, die qualitative Zusammensetzung komplizierter Gemenge aus dem Anblick des Spektrums ihrer Lötrohrflamme zu erkennen, habe ich einige Beobachtungen gemacht, welche einen unerwarteten Aufschluß über den Ursprung der Fraunhoferschen Linien geben und zu Schlüssen berechtigen von diesen auf die stoffliche Beschaffenheit der Atmosphäre der Sonne und vielleicht auch der helleren Fixsterne."

„Fraunhofer hat bemerkt, daß in dem Spektrum einer Kerzenflamme zwei helle Linien auftreten, die mit den beiden dunkeln Linien *D* des Sonnenspektrums zusammenfallen. Dieselben hellen Linien erhält man lichtstärker von einer Flamme, in die man Kochsalz gebracht hat. Ich entwarf ein Sonnenspektrum und ließ dabei die Sonnenstrahlen, bevor sie auf den Spalt fielen, durch eine kräftige Kochsalzflamme treten. War das Sonnenlicht hinreichend gedämpft, so erschienen an Stelle der beiden dunkeln Linien *D* zwei helle Linien; überstieg die Intensität jenes aber eine gewisse Grenze, so zeigten sich die beiden dunkeln Linien *D* in viel größerer Deutlichkeit, als ohne die Anwesenheit der Kochsalzflamme."

Als Kirchhoff diese Beobachtung gemacht und sich von der Richtigkeit derselben überzeugt hatte, verließ er mit den Worten „das scheint mir eine fundamentale Geschichte" das Laboratorium, um über die Sache nachzudenken. Am nächsten Tage hatte er den Zusammenhang erkannt. Es heißt in der Abhandlung weiter: „Ich schließe aus diesen Beobachtungen, daß farbige Flammen, in deren Spektrum helle, scharfe Linien vorkommen, Strahlen von der Farbe dieser Linien, wenn dieselben durch sie hindurchgehen, so schwächen, daß an Stelle der hellen Linien dunkle auftreten, sobald hinter der Flamme eine Lichtquelle von hinreichender Intensität angebracht wird, in deren Spektrum diese Linien sonst fehlen. Ich schließe weiter, daß die dunkeln Linien des Sonnenspektrums, welche nicht durch die Erdatmosphäre hervorgerufen werden, durch die Anwesenheit derjenigen Stoffe in der glühenden Sonnenatmosphäre entstehen, welche in dem Spektrum einer Flamme helle Linien an demselben Orte erzeugen. Man darf annehmen, daß die hellen, mit *D* übereinstimmenden Linien im Spektrum einer Flamme stets von einem Natriumgehalte derselben herrühren; die dunkeln Linien *D* im Sonnenspektrum lassen daher schließen, daß in der Sonnen-

Digitized by Google

atmosphäre Natrium sich befindet." Kirchhoff denkt sich also, daß der Sonnenkörper selbst weißglühend ist und Strahlen von allen Farben aussendet, daß aber die Sonnenatmosphäre von diesen Strahlen u. a. die gelben Natriumstrahlen *D* zurückhält, weil sie selbst glühenden Natriumdampf enthält. Das Sonnenspektrum ist also, wie man sieht, ein Absorptionsspektrum, indem einige der farbigen Strahlen des Spektrums ganz oder teilweise von dem Stoff aufgesaugt werden, von dem die Lichtquelle umgeben ist.

Kirchhoff schließt seine Abhandlung mit folgenden Worten: „Die Untersuchung der Spektren farbiger Flammen hat hiernach ein neues und hohes Interesse gewonnen; ich werde gemeinschaftlich mit Bunsen dieselbe so weit führen, als es unsere Mittel gestatten. Dabei werden wir die durch meine Beobachtung festgestellte Schwächung der Lichtstrahlen in Flammen weiter erforschen. Bei den Versuchen, die in dieser Richtung von uns bereits angestellt sind, hat sich schon eine Tatsache ergeben, die uns von großer Wichtigkeit zu sein scheint. Das Drummondsche Licht erfordert, damit in ihm die Linien *D* dunkel hervortreten, eine Kochsalzflamme von niederer Temperatur. Die Flamme von wässerigem Alkohol ist hierzu geeignet, die Flamme der Bunsenschen Gaslampe aber nicht. Bei der letzteren bewirkt die kleinste Menge von Kochsalz, sobald sie überhaupt sich bemerklich macht, daß die hellen Natriumlinien sich zeigen. Wir behalten es uns vor, die Konsequenzen zu entwickeln, die an diese Tatsache sich knüpfen lassen."

§ 432. Das wichtigste in dieser kurzen Abhandlung ist offenbar der Hinweis auf den Zusammenhang zwischen den Strahlen, die eine Flamme aussendet, und den Strahlen, welche sie schwächt, wenn man weißes Licht durch sie hindurchgehen läßt.

In der Wärmelehre (II, § 133 und 134) wird gezeigt werden, daß zwei Körper von gleicher Temperatur, die einander gegenübergestellt werden, sich im Strahlungsgleichgewicht befinden. Hieraus folgt notwendigerweise, daß das Ausstrahlungsvermögen und das Absorptionsvermögen bei beiden Körpern in demselben Verhältnis stehen muß. Strahlt der eine Körper eine zehnmal so große Wärmemenge aus als der andere, so kann nur dann Strahlungsgleichgewicht eintreten, wenn der erste Körper die Wärmestrahlen zehnmal so stark einsaugt als der zweite. Was aber für Wärmestrahlen gilt, gilt auch für Lichtstrahlen, da sich die Lichtstrahlen und die Wärmestrahlen, ähnlich wie die verschiedenen Farbenstrahlen, nur durch die Geschwindigkeit der Schwingungen unterscheiden (vergl. § 410 und II, § 145).

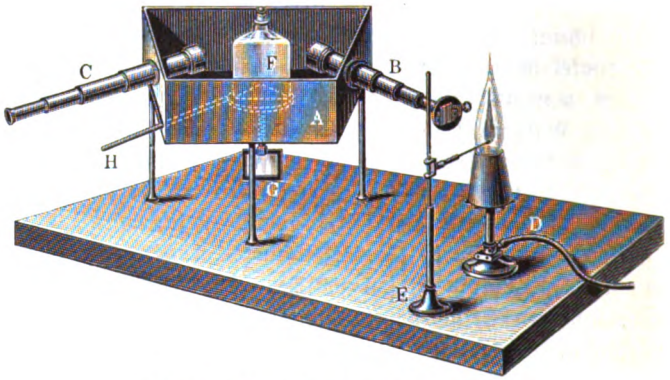
Kirchhoff entwickelte eingehender diesen Zusammenhang zwischen Ausstrahlung und Absorption. Er zeigte, daß das gefundene Verhältnis für jede einzelne Strahlenart gelten muß, die durch ihre Wellenlänge charakterisiert ist. Nun gibt es ja Flammen, die monochromatisches Licht, d. h. Licht von einer bestimmten Wellenlänge, aussenden. Eine solche monochromatische Flamme muß daher in besonders hohem Grade Licht absorbieren, dessen Wellenlänge gleich der Wellenlänge der von ihr selbst ausgesandten Strahlen ist.

Digitized by Google

Hiermit war der Versuch erklärt, der darin bestand, daß Sonnenlicht oder Kalklicht durch eine Natriumflamme hindurchging, bevor es durch ein Prisma zerstreut wurde. Die Natriumflamme strahlt das der Doppellinie *D* entsprechende Licht aus. Dasselbe Licht ist auch im Sonnenlicht enthalten, aber es ist in diesem viel stärker als in der Natriumflamme. Es wird in dieser Flamme geschwächt, so daß im Spektrum eine Linie erscheint, die lichtschwächer ist, als wenn das Sonnenlicht direkt in das Prisma eingetreten wäre. — Das Kalklicht enthält Strahlen von allen Farben. Es erzeugt also ein ununterbrochenes Spektrum. Läßt man es aber durch eine Natriumflamme hindurchgehen, so ist das Spektrum durch die dunkle Doppellinie *D* unterbrochen.

§ 433. Ehe die Arbeiten von Kirchhoff und Bunsen erschienen, hatte man noch keine hinreichenden Erfahrungen für die Tatsache, daß die Spektral-

Fig. 407.



Kirchhoffs erstes Spektroskop.

linien für den in der Flamme glühenden Stoff charakteristisch sind. Man hatte wohl eine Ahnung von diesem Zusammenhang, aber vollständig aufgeklärt wurde er doch erst durch Kirchhoff und Bunsen. Hierzu trug sehr wesentlich das von Kirchhoff konstruierte Spektroskop bei.

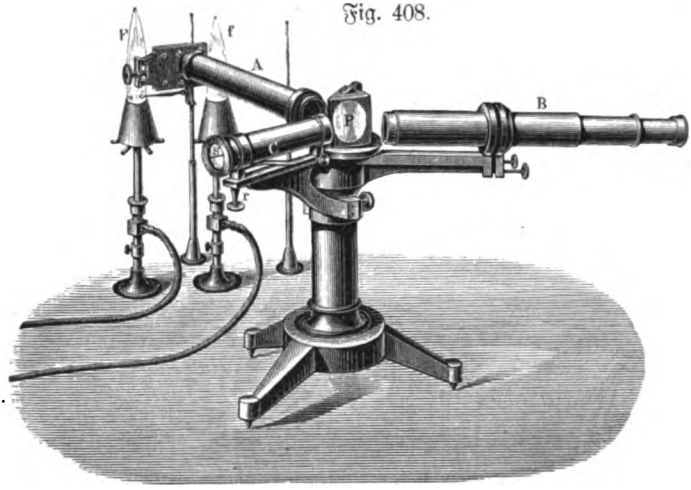
Das erste Spektroskop von Kirchhoff und Bunsen hatte die aus Fig. 407 ersichtliche Einrichtung. *F* ist ein Hohlprisma mit planparallelen Wänden, welches mit Schwefelkohlenstoff, einer stark lichtbrechenden Flüssigkeit, gefüllt ist. Das Rohr *B* hat an dem der Flamme zugewendeten Ende einen Spalt, am anderen Ende eine Sammellinse, welche die vom Spalt kommenden Strahlen parallel macht. Diese werden durch das Prisma gebrochen, und das Spektrum wird durch das Fernrohr *C*, welches achtfach vergrößert, beobachtet.

Professor Steinheil in München gab dem Spektroskop die in Fig. 408 abgebildete Form, welche heute allgemein gebräuchlich ist. Das Hohlprisma ist hier durch ein massives Glasprisma ersetzt, und außer dem Kollimatorrohr und dem Fernrohr ist noch ein drittes Rohr angebracht. Dieses Rohr ist an

Digitized by Google

dem dem Prisma zugewendeten Ende durch eine Sammellinse, am anderen Ende durch eine Glasplatte mit einer feinen Teilung geschlossen. Die durch das Rohr eintretenden Lichtstrahlen fallen auf die Prismenfläche und werden in das Beobachtungsfernrohr reflektiert, so daß der Beobachter im Gesichts-

Fig. 408.



Kirchhoffs verbessertes Spektroskop.

felde des Fernrohres oberhalb oder unterhalb des Spektrums die Teilung erblickt, vermittelst deren die Lage der Spektrallinien genau fixiert werden kann. Eine andere Verbesserung, die am Spektroskop angebracht wurde, besteht in einer Vorrichtung, die es ermöglicht, die Spektra zweier Lichtquellen

Fig. 409.

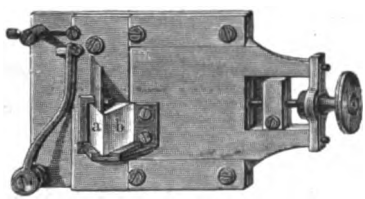
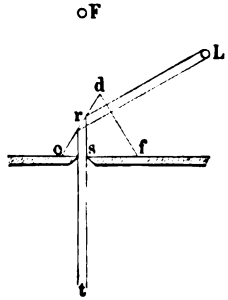


Fig. 410.



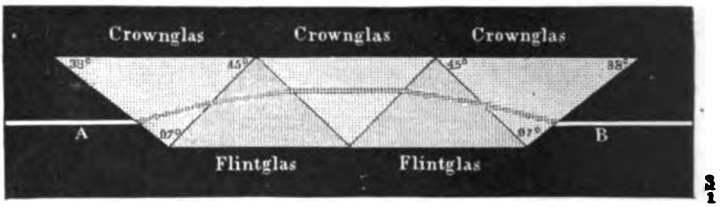
Spalt mit Prisma.

gleichzeitig zu beobachten. Zu diesem Zwecke ist die Hälfte des Spaltes durch ein gleichseitiges Prisma *ab* (Fig. 409) bedeckt. Die Strahlen, welche von einer Flamme kommen, die in der Verlängerung der Achse des Kollimatorrohres steht, treten durch den unbedeckten Teil des Spaltes ein. Durch das Prisma dagegen können sie nicht eindringen, da sie von den Seiten des

Digitized by Google

Prismas reflektiert werden. Stellt man dagegen eine Flamme *L* etwas seitlich vom Spalt auf (Fig. 410), so treten die auf die Fläche *df* fallenden Strahlen in das Prisma ein und werden von der Prismenfläche *cd* in den Spalt reflektiert. Von der Lichtquelle *L* können dagegen keine Strahlen in den unbedeckten Teil des Spaltes eintreten. Wenn also die beiden Flammen geradeaus und seitlich vor dem Spalt verschiedener Art sind, so sieht man im Fernrohr des Spektroskops gleichzeitig zwei verschiedene Spektra. Dieselben liegen unmittelbar übereinander, so daß man die Lage der Linien bequem vergleichen kann. — Man hat auch Spektroskope, bei denen die Achse des Fernrohres in die Verlängerung der Achse des Kollimatorrohres fällt (Fig. 411). Diese sogenannten geradsichtigen Spektroskope enthalten mehrere Kronglas- und Flintglasprismen, z. B. drei Kronglaslinsen und zwei Flintglasprismen.

Fig. 411.

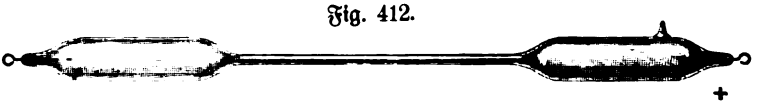


Geradsichtiges Spektroskop.

deren Winkel so bemessen sind, daß die Brechung, aber nicht die Zerstreuung der einen Gruppe durch die Wirkung der anderen Gruppe aufgehoben wird. Kleine Taschenspektroskope sind immer solche geradsichtige.

§ 434. Kirchhoff und Bunsen untersuchten die meisten bekannten Grundstoffe, namentlich die Metalle. Die zu untersuchende Substanz wurde an einem Platindraht befestigt und in der Flamme eines Bunsenschen Brenners, einer Wasserstoff- oder Knallgasflamme erhitzt. Bei der hohen

Fig. 412.



Geißlersche Röhre.

Temperatur verwandelte sich die Substanz in Dampf, und das Licht des glühenden Dampfes wurde untersucht. Diese Beobachtungen führten sofort zur Entdeckung zweier neuer Elemente, des Cäsiums und des Rubidiums. Später sind noch verschiedene andere Elemente, z. B. Thallium, Gallium und Indium, mit Hilfe des Spektroskops entdeckt worden (vergl. die Spektraltafel).

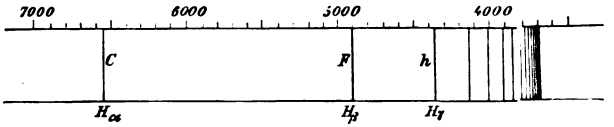
Die Spektra gasförmiger Körper beobachtet man mit Hilfe der sogen. Geißlerschen Röhren (Fig. 412), d. h. Glasröhren, die das Gas in verdünntem Zustande enthalten und in die zwei Platindrähte eingeschmolzen

Digitized by Google

sind, die dazu dienen, elektrische Funken, die von einem Induktionsapparat erzeugt werden, durch das Gas hindurchschlagen zu lassen. Das Gas wird dann glühend, und das Spektrum kann beobachtet werden, indem man den mittleren engen Teil der Röhre vor den Spalt des Spektroskops bringt. Das Wasserstoffspektrum (Fig. 413) besteht aus drei deutlichen Linien *C* (rot), *F* (grün) und *h* (violett), die mit den drei Fraunhoferschen Linien *C*, *F* und *h* zusammenfallen. Außerdem enthält das Wasserstoffspektrum noch eine Anzahl weniger deutlicher Linien im Violett.

Die Spektrallinien kommen nur dann zum Vorschein, wenn das Licht von glühenden Dämpfen oder Gasen ausgesandt wird, die sich unter einem passenden Druck befinden. Das von glühenden festen und flüssigen Körpern ausgesandte Licht erzeugt ein ununterbrochenes (kontinuierliches) Spektrum.

Fig. 413.



Das Wasserstoffspektrum.

Das Spektrum kann auch ein Mittelding zwischen einem kontinuierlichen Spektrum und einem Linienspektrum, ein sogen. Bandenspektrum sein, in welchem eine Reihe heller Banden mit dunkeln Zwischenräumen abwechseln. Wird das Licht stärker zerstreut, so lösen sich die Banden in Gruppen von hellen Linien auf und es entsteht ein sogen. kanneliertes Spektrum. — Bandenspektra werden besonders durch Glühen zusammengesetzter Stoffe, z. B. durch Kohlenwasserstoffe, erzeugt. Aber auch gasförmige Elemente können Bandenspektra erzeugen, z. B. wenn die elektrischen Funken in einer Geißlerschen Röhre nicht hinreichend stark sind.

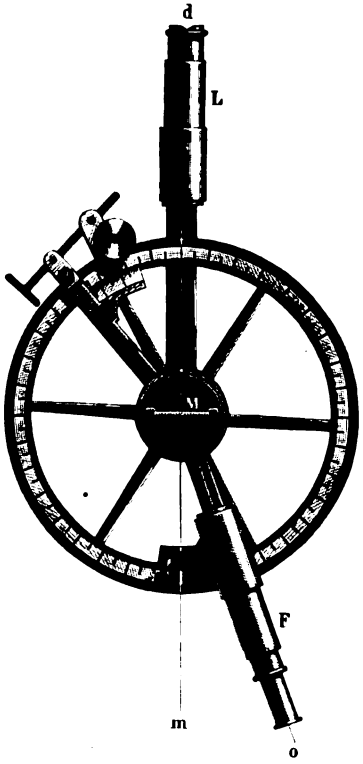
Durch spektralanalytische Untersuchung kann man, wie bereits Herschel und Talbot hervorgehoben hatten, außerordentlich geringe Mengen einer Substanz nachweisen. Kirchhoff und Bunsen fanden, daß $^1/_{3\,000\,000}$ Milligramm chlorsaures Natron eine Flamme färbte, so daß sie eine deutliche Natriumlinie gab, und später hat man durch Induktionsfunken $^1/_{40\,000\,000}$ Milligramm Lithium nachgewiesen.

§ 435. Bei der Untersuchung von weniger brechbaren Strahlen und von Licht starker Lichtquellen wendet man mit Vorteil Gitterspektroskope an, die den Vorzug haben, daß sie unmittelbaren Aufschluß über die Wellenlänge der Spektrallinien geben. An dem in Fig. 414 abgebildeten Apparat ist *L* der Kollimator, *M* ein Glasgitter und *F* das Fernrohr, in dem man das Gitterspektrum erblickt. Auf einem geteilten Kreis wird der Drehungswinkel (Beugungswinkel) abgelesen, und aus der Größe dieses Winkels ergibt sich die Wellenlänge der Spektrallinie, auf die das Fadenkreuz des Fernrohres eingestellt ist (vergl. § 426). Mit einem solchen Instrument bestimmte der

Digitized by Google

schwedische Physiker Anders J. Ångström (1814 bis 1874) sehr genau die Lage der dunkeln Linien des Sonnenspektrums. Sein berühmter Spektralatlas (1869) bildete 20 Jahre lang die Grundlage für die genaue Bestimmung von Wellenlängen. In neuerer Zeit findet bei spektroskopischen Untersuchungen die Photographie ausgedehnte Anwendung.

Fig. 414.



Gitterspektroskop.

§ 436. Nachdem es Kirchhoff und Bunsen gelungen war, sicher nachzuweisen, daß die Spektrallinien wirklich für die verschiedenen Grundstoffe charakteristisch sind, unternahmen sie eine eingehende Untersuchung des Sonnenspektrums. Zu diesem Zwecke konstruierte Kirchhoff ein stark zerstreuendes Spektroskop mit vier Flintglasprismen (Fig. 415). Mit Hilfe dieser sorgfältigen Messungen führten die beiden ausgezeichneten Forscher, gestützt auf Kirchhoffs Theorie der Absorption der Lichtstrahlen (§ 431), den Nachweis, daß eine große Anzahl der auf der Erde vorkommenden Elemente auch in der Sonne enthalten ist. Sie legten hiermit den Grund zu einer neuen Wissenschaft, deren Aufgabe es ist, die physikalische Beschaffenheit der Himmelskörper zu erforschen. Dieser Wissenschaft wurde 1865 von Zöllner der Name Astrophysik beigelegt.

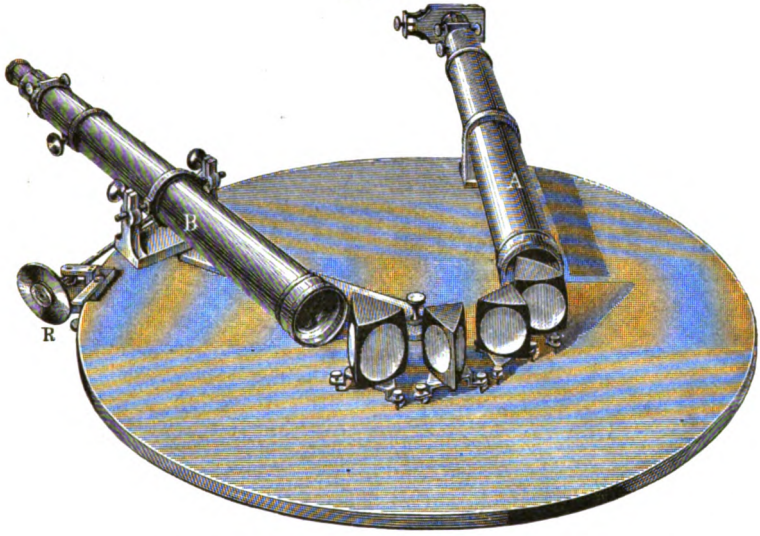
Den Ausgangspunkt für die Bestimmung der in der Sonne vorkommenden Stoffe bildeten Kirchhoffs Versuch mit der Natriumflamme und die Schlüsse, welche er aus diesem Versuch gezogen hatte (§ 432).

Kirchhoff dachte sich die Sonne als einen festen, weißglühenden Körper, der von einer Dampfhülle umgeben ist, in der Metalle im dampfförmigen Zustande enthalten sind, da die Temperatur der Sonnenoberfläche eine außerordentlich hohe ist. Die Sonnenflecken betrachtete Kirchhoff als Wolken in der Sonnenatmosphäre, also als mehr oder weniger verdichtete Dampfmassen. — Der Sonnenkern ist der heißeste Teil der Sonne, und von ihm strahlt die Hauptmenge des Sonnenlichtes aus. Dies muß also die Dampfatmosphäre durchstrahlen, die ebenfalls glühend ist, aber eine niedrigere Temperatur hat als der Sonnenkern. Die Dampfatmosphäre wirkt nun in ähnlicher Weise wie die Natriumflamme bei dem Kirchhoffschen Versuch (§ 431), d. h. sie absorbiert dieselben Strahlen, welche sie selbst ausstrahlt. Das

Digitized by Google

Spektrum des Sonnenlichtes, welches nach der Erde kommt, zeigt daher dunkle (lichtschwache) Linien, die denjenigen Strahlen entsprechen, welche die Sonnenatmosphäre absorbiert hat. Von den dunkeln (Fraunhoferschen) Linien des Sonnenspektrums entspricht eine große Zahl den Spektrallinien bekannter Metalle, und aus dieser Übereinstimmung zogen Kirchhoff und Bunsen den

Fig. 415.



Kirchhoffs stark zerstreuendes Spektroskop.

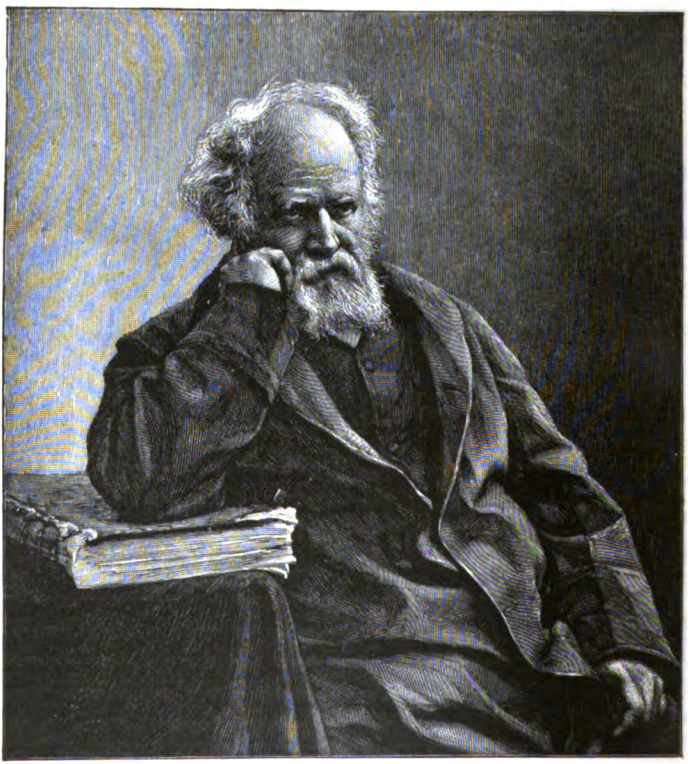
Schluß, daß die betreffenden Metalle im dampfförmigen Zustande auf der Oberfläche der Sonne vorhanden sind.

§ 437. Es würde offenbar von der größten Bedeutung sein, wenn man für die Richtigkeit der Kirchhoffschen Theorie der absorbierenden Wirkung der Sonnenatmosphäre auf das Licht des Sonnenkerns einen Beweis beibringen könnte, und zwar einen Beweis, der sich nicht auf Versuche mit leuchtenden Flammen, sondern auf direkte Beobachtung des Sonnenlichtes stützt. Ein solcher Beweis ist nun tatsächlich erbracht worden. Bevor wir uns jedoch mit demselben bekannt machen, müssen wir zunächst die gegenwärtige Ansicht der Astrophysiker über den Bau der Sonne kennen lernen. — Man spricht auch jetzt noch von einem Sonnenkern. Derselbe ist aber einer direkten Untersuchung nicht zugänglich. Er ist höchst wahrscheinlich gasförmig, da seine Dichte nur 1,4 ist (§ 310). Wäre er flüssig, so müßte er viel dichter sein, da er bedeutende Mengen schwerer Metalle enthält. Allein der gasförmige Sonnenkern ist nicht ohne weiteres mit einer Gasmasse auf der Erdoberfläche zu vergleichen. Infolge des hohen Druckes, der auf der Sonne herrscht, hat der Sonnenkern eine Dichtigkeit, die größer ist als die Dichtigkeit des Wassers, aber trotzdem ist er wegen der hohen Temperatur gasförmig.

Digitized by Google

Die ſichtbare Oberfläche der Sonne wird von einer ſtark glühenden Wolkenſchicht, der Photoſphäre, gebildet, die den Sonnenkern umhüllt. In dieſer Photoſphäre entſtehen die Sonnenflecken und erheben ſich die Sonnenfackeln. Die Sonnenflecken, welche zuweilen eine Ausdehnung von einer Million Quadratmeilen haben können, ſind Vertiefungen in der Photoſphäre und ſie ſind dunkel, weil die Vertiefungen mit verhältnismäßig kaltem und daher ſtark abſorbierendem Dampf angefüllt ſind, der von den äußeren Gasſchichten in dieſe Vertiefungen hinabgeſunken iſt. Die Sonnenfackeln

Fig. 416.



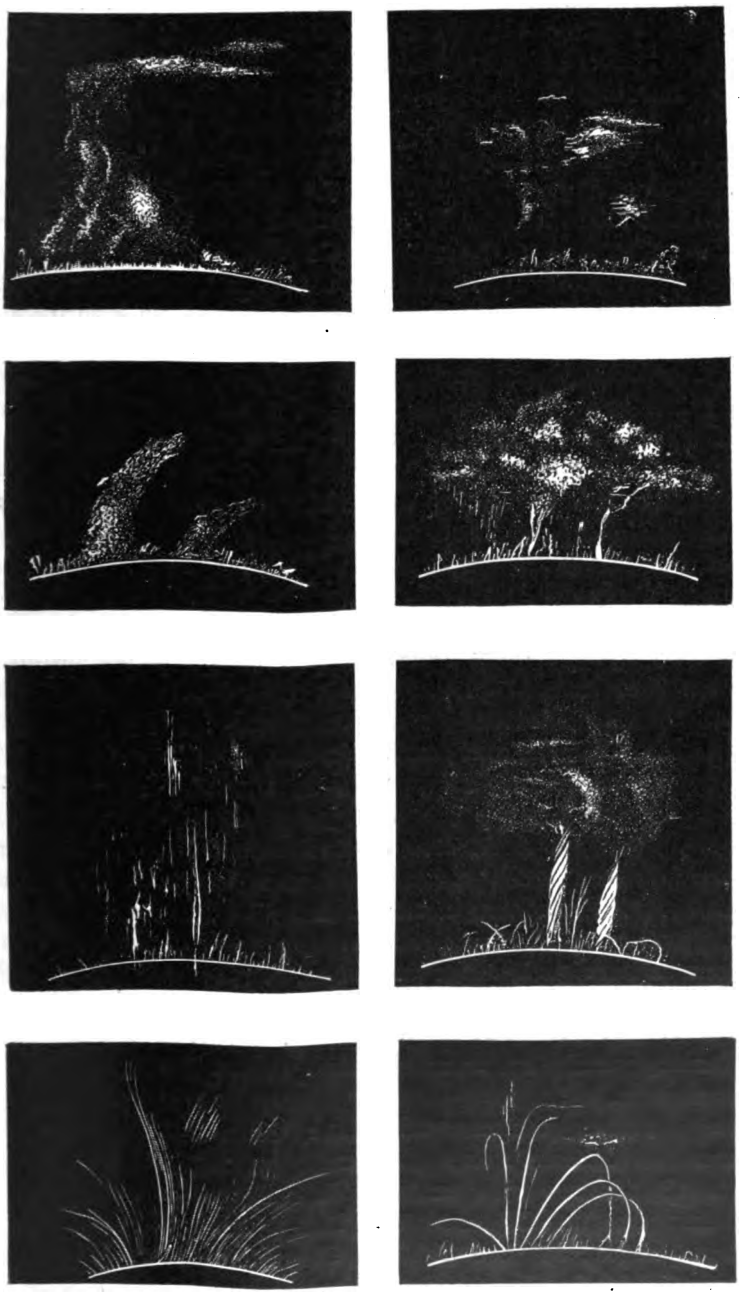
P. J. C. Janßen.

werden durch den entgegeſetzten Vorgang erzeugt, d. h. dadurch, daß an einzelnen Stellen der Photoſphäre heiße Dämpfe emporgeſchleudert werden. Die Fackeln können eine Höhe von 10000 Meilen erreichen und ſie ſind lichtſtärker als die übrige Photoſphäre, weil das Licht, welches ſie ausſtrahlen, eine dünnere Gasſchicht zu durchdringen hat.

Die Photoſphäre wird von einer etwas kälteren Gasſchicht von ungefähr 200 Meilen Dicke bedeckt. In dieſer Schicht findet die Abſorption ſtatt, welche die Fraunhoferſchen Linien erzeugt.

Digitized by Google

Fig. 417.



Protuberanzen.

Digitized by Google

Die absorbierende Schicht geht in die scharlachrote Chromosphäre über, die außer anderen Elementen große Mengen Wasserstoff enthält. Die Chromosphäre sendet oft wunderlich gestaltete Auswüchse aus, die sogenannten Protuberanzen, und ist von dem äußersten Teile der Sonnenatmosphäre, der Corona, umgeben, die sich allmählich im dunkeln Himmelsraum verliert.

§ 438. Unter gewöhnlichen Verhältnissen sind die verschiedenen Schichten, aus denen die Sonnenatmosphäre besteht, nicht voneinander zu unterscheiden. Aber während einer totalen Sonnenfinsternis können wir die äußeren glühenden Gashüllen studieren, da dann die Mondscheibe den Sonnenkern und die Photosphäre bedeckt. — Eine während der Dauer einer totalen Sonnenfinsternis vorgenommene spektralanalytische Untersuchung der äußeren glühenden Schichten der Sonnenatmosphäre kann offenbar dazu dienen, die von Kirchhoff aufgestellte Theorie der Fraunhoferschen Linien zu kontrollieren. Während der Verfinsterung wird nämlich das Licht der Photosphäre vom Monde zurückgehalten und es kommt nur von den äußeren Schichten, die nach Kirchhoffs Theorie die Absorption bewirken, Licht nach der Erde. Man hat hier gewissermaßen denselben Fall, als wenn man bei dem in § 431 erwähnten Versuch das Licht der Natriumflamme allein mit dem Spektroskop untersucht. Bei einer spektroskopischen Untersuchung des Sonnenlichtes während einer totalen Sonnenfinsternis müssen also die Spektrallinien hell auf dunklem Grunde erscheinen.

Die totale Sonnenfinsternis im Jahre 1868 wurde benutzt, um die Richtigkeit der Kirchhoffschen Theorie zu prüfen. Die französische Akademie sandte den Astronomen P. J. C. Janßen (geb. 1824) nach Ostindien, wo die Finsternis unter besonders günstigen Umständen beobachtet werden konnte. Janßen richtete seine Aufmerksamkeit besonders auf die Protuberanzen, diese eigentümlichen und mannigfaltig gestalteten Ausläufer der Chromosphäre. Dieselben sind stark leuchtend und nicht selten von außerordentlicher Größe (Fig. 417). Janßen richtete das Spektroskop auf die Protuberanzen und beobachtete ein aus hellen Linien bestehendes Spektrum. Hiermit war bewiesen, daß die Protuberanzen aus glühenden Gasen bestehen.

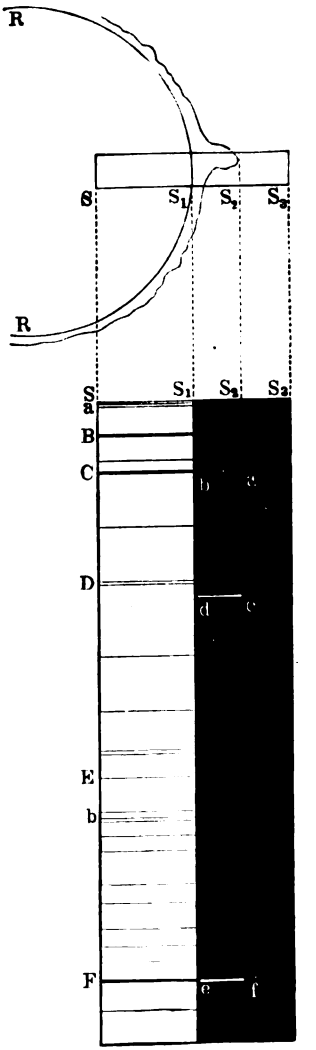
Noch während seiner Beobachtungen fand Janßen ein Verfahren, die Protuberanzen unter gewöhnlichen Umständen, d. h. bei unverfinsterter Sonne, zu untersuchen. Dasselbe Verfahren fand ungefähr gleichzeitig der englische Astronom J. Norman Lockyer (geb. 1836), und dieser wandte das Verfahren bereits praktisch an, bevor Mitteilungen von Janßen nach Europa gekommen waren.

Die Protuberanzen können bei vollem Sonnenlicht beobachtet werden, wenn man das Okularrohr eines astronomischen Fernrohres durch den Kollimator des Spektroskops ersetzt, und zwar so, daß der Kollimatorspalt genau in den Brennpunkt des Objektivs fällt. Das Fernrohr wird dann so gegen die Sonne gerichtet, daß das Bild des Sonnenrandes auf den Spalt des Spektroskops fällt. In Fig. 418 ist RR das Sonnenbild und SS_2 der Spalt. Das Spektroskop muß stark zerstreuen, also eine größere Anzahl von Prismen

Digitized by Google

enthalten. Das Licht von SS_1, welches direktes Sonnenlicht ist, gibt das gewöhnliche Sonnenspektrum mit den Fraunhoferschen Linien. — Das Licht von S_1S_2 zeigt ein etwas anderes Verhalten. Es besteht zum Teil aus gewöhnlichem Sonnenlicht, zum Teil aus dem Licht der Protuberanzen. Das gewöhnliche Sonnenlicht (Tageslicht), welches auf S_1S_2 fällt, ist aber nur schwach und erzeugt daher in dem stark zerstreuenden Spektroskop nur ein lichtschwaches Spektrum. Das Protuberanzenlicht dagegen wird durch die starke Zerstreuung des Spektroskops nicht geschwächt, weil es nur einzelne helle Linien gibt. Diese treten daher deutlich auf dem lichtschwachen Sonnenspektrum hervor. In der Figur sind drei Protuberanzenlinien angegeben. Die erste derselben, *ab*, entspricht der Fraunhoferschen Linie *C*, die zweite, *cd*, liegt im Gelb, und die dritte, *ef*, entspricht der Fraunhoferschen Linie *F*.

Fig. 418.



Spektrum der Protuberanzen.

Wird der Spalt gedreht, so daß er den Sonnenrand berührt, so kann man die Form der Protuberanzen erkennen, wenn man den Spalt so weit macht, daß ein Bild der Protuberanz in demselben entstehen kann (Fig. 419, a. f. S.). Hat die Protuberanz drei Spektrallinien, so erhält man natürlich drei Bilder der Protuberanz, eins von jeder Farbe.

In den Protuberanzen findet sich immer Wasserstoff und Calcium. Außerdem hat das Protuberanzenspektrum immer eine gelbe Linie in der Nähe der Natriumlinie. Bis zum Jahre 1895 kannte man keinen Stoff, der diese Linie hervorbringt. Man nannte das Element, welches als Bestandteil irdischer Substanzen nicht bekannt war, wegen seines Vorkommens in der Sonne Helium. Erst in dem genannten Jahre wurde das Helium von Cleve als Bestandteil des Cleveits erkannt und von Ramsay isoliert und genauer untersucht.

Die Protuberanzen enthalten zuweilen auch Eisen, Natrium, Nickel, Kobalt, Mangan, Baryum, Strontium, Titan und Magnesium.

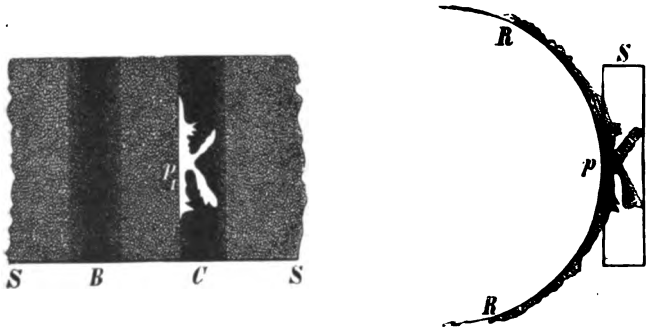
§ 439. Während einer Sonnenfinsternis kann das Licht derjenigen Schicht der Sonnenatmosphäre, welche unmittelbar über der Photosphäre liegt,

Digitized by Google

untersucht werden. Diese Schicht erzeugt die Fraunhoferschen Linien. Wenn daher die Kirchhoffsche Theorie richtig ist, so muß das Licht dieser Schicht diejenigen Strahlen enthalten, welche im Sonnenspektrum fehlen, abgesehen von denjenigen Strahlen, welche von der Atmosphäre der Erde absorbiert werden (§ 441). Dies ist auch durch die Beobachtungen bestätigt worden, welche man bei Gelegenheit der Finsternisse gemacht hat, die seit Aufstellung jener Theorie stattgefunden haben.

Die Protuberanzen und die absorbierende Schicht haben eine Reihe von Stoffen gemeinsam, aber die absorbierende Schicht enthält mehr als die Protuberanzen. Man hat bis jetzt die Anwesenheit von etwa 30 irdischen Elementen in der Sonne nachgewiesen. Das Spektrum der Corona zeigt eine grüne Linie, von der wir nicht wissen, durch welchen Stoff sie erzeugt wird. Andererseits kennen wir viele Stoffe (z. B. Gold und Quecksilber), deren Linien man im Sonnenspektrum nicht beobachtet hat.

Fig. 419.



Protuberanzenbild.

§ 440. Die Spektra der Fixsterne haben Ähnlichkeit mit dem Sonnenspektrum, doch finden sich die dunkeln Linien nicht immer an denselben Stellen. Wir können hieraus schließen, daß die Fixsterne ebenso wie die Sonne einen stark glühenden Kern besitzen, der von einer Hülle glühender Dämpfe umgeben wird.

A. Secchi (gest. 1878) und H. C. Vogel haben die Sternspektra nach der Helligkeit der Sterne in drei Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe umfaßt die Spektra der „weißen" Sterne, die so stark glühen, daß die Metalldämpfe in ihren Atmosphären nur wenig Licht absorbieren. Diese Spektra zeigen kräftige Wasserstofflinien und schwache Metalllinien, einzelne auch die Heliumlinie (Sirius, Wega). Die zweite Gruppe umfaßt Spektra von Sternen, die sich in einem ähnlichen Zustande des Glühens befinden wie die Sonne. Die dunkeln Absorptionslinien sind kräftig und deutlich (Kapella, Aldebaran). Die dritte Gruppe enthält Spektra von Sternen, die so schwach glühen, daß die Elemente, welche ihre Atmosphäre bilden, nicht mehr im freien Zustande existieren, sondern sich zu chemischen Verbindungen

Digitized by Google

vereinigt haben. Die Spektra zeigen dunkle Linien und Banden (α im Herkules). In den Nebelflecken hat man Wasserstoff und Stickstoff nachgewiesen. Auch die Heliumlinie glaubt man im Spektrum der Nebelflecke erkannt zu haben.

§ 441. Ein Teil der Fraunhoferschen Linien wird nicht durch die Absorption in der Sonnenatmosphäre, sondern durch die absorbierende Wirkung der Erdatmosphäre erzeugt. Diese durch den Stickstoff, den Sauerstoff und den Wasserstoff erzeugten sogen. tellurischen Linien sind am deutlichsten, wenn die Sonne tief am Himmel steht, da in diesem Falle die Lichtstrahlen einen längeren Weg durch die Luft zurückzulegen haben, als wenn die Sonne hoch steht.

Die spektroskopische Untersuchung des Lichtes der Planeten hat zu dem Ergebnis geführt, daß Merkur, Venus und Mars Atmosphären besitzen, die von der Erdatmosphäre nicht merklich verschieden sind. Das Licht vom Jupiter und vom Saturn gibt dagegen einen Absorptionsstreifen, der entweder durch eine eigentümliche Luftart erzeugt wird oder von den in den Atmosphären dieser Planeten herrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen herrührt. Die Atmosphären vom Uranus und Jupiter sind von der Erdatmosphäre sehr verschieden und enthalten jedenfalls einen Stoff, der in der Erdatmosphäre nicht vorkommt.

Das Spektrum des Mondes stimmt mit dem Sonnenspektrum vollkommen überein, ein Beweis, daß der Mond keine nennenswerte Atmosphäre besitzt.

Die Kometen zeigen zum Teil ein schwaches, kontinuierliches Spektrum (reflektiertes Sonnenlicht), zum Teil ein Kohlenwasserstoffspektrum. Bei einzelnen Kometen hat man auch Natrium- und Eisenlinien beobachtet.

§ 442. So hat uns die Spektralanalyse in den Stand gesetzt, die physikalische und chemische Beschaffenheit der selbstleuchtenden Himmelskörper bis zu einem gewissen Grade zu erforschen. Fraunhofers sorgfältiges Studium der dunkeln Linien des Sonnenspektrums war der erste Schritt zu der Kunst, die Farbensprache des Lichtes zu lesen, und Kirchhoff deutete das Alphabet der Lichtschrift durch die Entdeckung, daß glühende Gase Licht von derselben Wellenlänge ausstrahlen und absorbieren.

Die Spektralanalyse dient jetzt zahlreichen Forschern als Hilfsmittel für wissenschaftliche Eroberungen, während sie andererseits bei praktischen Arbeiten im Laboratorium Anwendung findet. Der praktische Chemiker benutzt aber nicht nur die Emissionsspektra mit hellen Linien, um die Anwesenheit eines Stoffes zu erkennen, sondern auch die Absorptionsspektra mit dunkeln Linien und Streifen, welche durch Licht erzeugt werden, das durch einen absorbierenden Stoff hindurchgegangen ist. Das entstehende Spektrum bildet ein Kennzeichen für die absorbierende Substanz, und viele Dämpfe und Flüssigkeiten geben sehr charakteristische Absorptionsspektra.

Die Spektralanalyse hat ein sehr ausgedehntes Arbeitsfeld. Der Astrophysiker erkennt mit seinem spektroskopischen Fernrohre die Anwesenheit von Wasserstoff in Sternen, die Tausende von Lichtjahren von uns entfernt sind,

Digitized by Google

und der praktische Gerichtschemiker bedient sich des Spektroskops, um den Tatbestand einer Weinverfälschung oder einer Kohlendunstvergiftung festzustellen. — Newton hatte Recht, wenn er das Studium des reinen Spektrums als eine lohnende Aufgabe bezeichnete (vergl. § 422).

Kirchhoff hatte die Freude, die schnelle und fruchtbare Entwickelung der Spektralanalyse zu erleben. Seit dem Jahre 1868 war er kränklich, so daß er sich nicht mehr mit Experimentalunterſuchungen beschäftigen konnte, als er 1875 nach Berlin berufen wurde. Er widmete als ein würdiger Schüler Neumanns seine letzten Kräfte mathematisch-physikalischen Untersuchungen. Er starb 1887. Sein Freund und Mitarbeiter R. W. Bunsen, der ein ausgezeichneter Experimentator war, starb 1899.

Digitized by Google

Alphabetisches Register.

A.

Aberration des Lichtes 296.
Abplattung der Erde 287.
Absorptionsspektrum 489.
Accademia del Cimento 370.
Achromatische Linsen 425.
Achsendrehung der Erde 60, 316.
Äolsharfe 389.
Agatharkos 82.
Airy 327, 375.
Akkommodation des Auges 403.
Alfons X. 52.
Alhazen 102, 113.
Alkuin 52.
Al Mamun 52.
Amati 116.
Anamorphosen 101.
Anaxagoras 83.
Anaximander 39.
Anziehung der Himmelskörper 322.
Appius Claudius 130.
Araber 299.
Aräometer 216.
Archimedes 29, 95, 130 f., 202, 214.
Archimedisches Prinzip 204.
Aristarch 27, 28, 29, 30, 31, 38.
Aristoteles 26, 53, 84, 115, 129, 152, 163, 173, 205, 243, 274, 417, 426.
Artesischer Brunnen 207.
Atmosphärische Eisenbahn 274.
Auge 117.

B.

Bacon, Francis 181.
Bacon, Roger 18, 85, 95.
Baily 326.
Barnard 332.
Barometer 248.
Barometrische Höhenmessung 270.
Bartholin 292, 437.
Baumé 216.
Behaim 57.
Benedetti 185.
Benzenberg 316, 371.
Berberini 160.
Bernoulli 179.
Bessel 327, 357 fg.
Beugung des Lichtes 435.
Beugungsspektrum 452, 471.
Bianconi 371.
Bilanz 174.
Biot 381.
Bode 337.
Bodendruck 208.
Borelli 311.
Bouguer 289, 324.
Boyle 265, 308, 370.
Boylesches Gesetz 266.
Boys 327.
Bradley 296, 343.
Brahe, Tycho 14, 33, 62 fg., 178, 285, 329.
Bramah 213.
Brechung des Lichtes 47, 101 fg.
Brechung der Schallwellen 385.
Brechungsgesetz 114.
Breite, geographische 40.
Brewster 94, 306, 433.
Brille 116.
Bunsen 475 fg.

C.

Cäsar 17.
Cagniard de Latour 403.
Cardanische Aufhängung 140.
Cardanus 141.
Cassini, D. 288, 290 fg., 329, 370.
Cavendish 325.

Digitized by Google

Celsius 289.
Charles 278.
Chladni 390.
Chromosphäre 486.
Clark 361.
Cleve 487.
Colladon 383.
Columbus 55, 58.
Condamine 289, 324, 371.
Cornu 302.
Cortisches Organ 413.
Cykloidenpendel 179.

D.

Deklination 34.
Del Monte 141, 156.
Demokrit 82.
Derham 371.
Descartes 113, 184, 193, 418, 428.
Differentialflaschenzug 147.
Dion Cassius 19.
Dollond 425.
Dominis, de 428.
Donders 407.
Doppelbrechung 437, 453, 460.
Doppelsterne 352.
Dörfel 338.
Dove 403.
Druckpumpe 232.
Dunkelkammer 88, 107.

E.

Ebbe und Flut 343, 376.
Edison 410.
Ekliptik 8, 28.
Ellicot 388.
Emissionsspektrum 489.
Emissionstheorie 439, 442.
Energie 197.
Epicykel 49.
Eratosthenes 26.
Erde, Gestalt 23, 56, 283; Bewegung 28, 45, 314, 371; Größe 26.
Erhaltung der Energie 198.
Eudoxus 49.
Euklid 115.
Euler 447.
Eustachische Röhre 412.

F.

Fahrenheit 267.
Fall, freier 155, 165.
Fall auf der schiefen Ebene 168.
Farben 417 fg.; komplementäre 434.
Farbenringe 401.
Fermat 311.
Fernel 283.
Fernrohr 110.
Feuerspritze 231.
Fixus 236.
Fixsterne 347: Bewegung 350, 361; Zahl 351; Entfernung 351, 360.
Fizeau 300.
Flamsteed 296, 336, 370.
Flaschenzug 130, 146.
Fluoreszenz 433.
Fortpflanzung des Lichtes 81; des Schalles 370, 377.
Foucault 303.
Fraunhofer 357, 466 fg.
Fraunhofersche Linien 466 fg.
Fresnel 457.
Frühlingsäquinoktium 8.
Frühlingspunkt 9; Verschiebung 37.

G.

Galilei 110, 152 fg., 191, 193, 197, 212, 243, 333.
Galle 328.
Garcia 406.
Gassendi 370.
Gauß 337.
Gehörorgan 411.
Geißlersche Röhren 480.
Georg von Trapezunt 55.
Geschwindigkeit des Lichtes 291 fg.; des Schalles 370, 378; im Wasser 380.
Gesichtskreis 6.
Gewicht der Luft 243, 271.
Ghetaldi 214.
Gitterspektrum 469, 481.
Gleichgewicht 140, 143; schwimmender Körper 206.
Gnomon 12.
Godin 289.
Göthe 433.
Gradmessung 286 fg.
Gramm 290.
Gregor XIII. 18.
Grimaldi 435, 451.
Guericke 254 fg.

H.

Halley 276, 297, 316, 329, 340, 349, 370.
Harding 337.

Digitized by Google

Harmonie 398.
Harun al Raschid 172.
Hebel 123, 134.
Heber 223, 252.
Heliometer 357.
Helmholtz 393 fg., 403, 407.
Herbstäquinoktium 8.
Heron 220 fg., 243, 274.
Heronsball 230.
Herschel, J. 355.
Herschel, W. 327, 347 fg.
Herschels Teleskop 349.
Himmelsäquator 6.
Himmelsgewölbe, Drehung 25.
Himmelsglobus 8.
Hipparch 32 fg.
Hohlspiegel 95.
Hooke 179, 276, 308, 312, 418.
Horizont 6.
Horoskop 76.
Horrebow 295.
Hundssternperiode 16.
Huygens 176 fg., 193, 287, 341, 370, 388, 443.
Hydraulische Presse 213.
Hydrostatik 202.
Hydrostatisches Paradoxon 209.
Hydrostatische Wage 215.

J.

Janssen 486.
Interferenz der Lichtwellen 470; der Schallwellen 387.
Interferenzgitter 471.
Intervalle, wohlklingende 398.
Jolly 327.
Jupitermonde 157.

K.

Kaleidoskop 94.
Kalender, julianischer 17; gregorianischer 18.
Kalippus 17.
Kammerton 370.
Karl der Große 52.
Kartenzeichnen 42.
Kegelprojektion 43.
Kehlkopf 405.
Kehlkopfspiegel 406.
Kempelen 407.
Kepler 73 fg., 87, 111, 114, 116, 311, 329, 336, 338.
Keplersche Gesetze 75, 319.
Kircher 389.
Kirchhoff 475 fg.
Klangfiguren 392.
Kleomedes 46.
Klingenstjerne 424.
Kometen 11, 338.
Kommunizierende Gefäße 207.
Komplementäre Farben 434.
Kompressionspumpe 273.
Konvexspiegel 100.
Kopernikanisches System 60.
Kopernikus 32, 58 fg., 329.
Kratzenstein 406.
Kreisberechnung 132.
Kreisteilung 13.
Kremer, G. 43.
Ktesibios 172, 199, 220.
Kugelgestalt der Erde 23.

L.

Lactantius 101.
Länge, geographische 40.
Lagrange 370.
Lana, F. 277.
Laplace 378.
Laterna magica 109.
Leerer Raum 222, 244, 255.
Leonardo da Vinci 116, 119, 141.
Leverrier 328.
Linsen 104.
Linus 266.
Lippenpfeifen 395.
Lippershey 110.
Lissajoussche Figuren 402.
Lockyer 486.
Luftballon 278.
Luftdruck 257.
Luftpumpe 257.
Luftwellen 377.

M.

Mästlin 74.
Magdeburger Halbkugeln 259.
Malus 452.
Marcellus 130.
Marci 193, 418.
Mariotte 119, 269.
Mariottesche Flasche 272.
Marius 332.
Mars 335.
Maskelyne 325.
Masse der Erde 324 fg.; der Himmelskörper 323.

Digitized by Google

Maurepas 289.
Maurolykos 88, 102, 107, 116.
Mercator 43.
Mercatorsche Projektion 44.
Meridian 40.
Meridianinstrumente 33.
Mersenne 367, 370.
Meter 128, 290.
Metius 110.
Metonischer Zyklus 17.
Milchstraße 354.
Miller 473.
Molyneux 297.
Mond, Bewegung 7, 310; Entfernung 30, 32; Umlaufszeit 9; Beschaffenheit 334.
Mondberge 157.
Monde 332.
Mondfinsternisse 46.
Mondphasen 9.
Montgolfier 278.
Morsing 71.

N.

Nachtbogen 6.
Nadir 14.
Nebelflecke 355.
Nebenplaneten 332.
Neptun 328.
Newton 288, 305 fg., 323, 338, 341, 418, 440, 454, 465.
Newtonsche Farbenringe 401, 449.
Nicholsons Aräometer 217.
Nicolsches Prisma 461.
Noble 388.
Nonius 285.
Nordlinie 11.
Norwood 284.

O.

Obertöne 390.
Ohr 411.
Olbers 337.
Omar 51, 336.
Orgelpfeifen 395.

P.

Parallelogramm der Kräfte 189.
Parmenides 24.
Pascal 250.
Pascalsche Gefäße 208.
Pendelbewegung 170.
Perspektive 82.
Perturbationen 327.
Phonograph 410.
Photometrie 89.
Piazzi 337.
Picard 284, 288, 290, 296, 370.
Pigot 384.
Planeten 10, 49, 61.
Planetensystem 331.
Planetoiden 337.
Platon 26, 129.
Polarisation des Lichtes 456.
Polybius 131.
Porta 110, 116, 147, 172.
Posidonius 45.
Potenzflaschenzug 146.
Präzession der Äquinoktialpunkte 38, 341.
Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten 147.
Prisma 103.
Projektion, stereographische 43.
Protuberanzen 485.
Ptolemäisches Weltsystem 50.
Ptolemäus 26, 38, 43, 47, 48, 49, 53, 84, 95.
Purbach 55.
Pythagoras 22, 367.

R.

Radlinie 178.
Räderwerke 174.
Ramsay 487.
Reflexion des Lichtes 90 fg., vollständige 114; der Wellen 383; des Schalles 384.
Regenbogen 426.
Regenbogenfarben 418 fg.
Regiomontanus 54, 285.
Reich 316.
Rektascension 34.
Resonanzröhren 397.
Resonator 397.
Rhäticus 60.
Riccioli 284.
Richarz 327.
Richter 287, 329.
Robervalsche Wage 147.
Robison 403.
Römer 178, 292 fg., 370.
Rolle 145.

S.

Sagredo 156.
Sammellinse 105.

Digitized by Google

Sanduhr 173.
Satelliten 332.
Saturn 333.
Saturnring 177.
Saugpumpe 233.
Sauveur 369, 390.
Schattenlehre 83.
Scheiner 111, 117.
Schiaparelli 331.
Schiefe Ebene 151, 168.
Schnellwage 126.
Schraube 131.
Schraubenpresse 150.
Schwerpunkt 136.
Schwingungsknoten 390.
Schwingungszahl der Töne 369; des Lichtes 451.
Schyrl 112.
Secchi 488.
Seebeck 403.
Seitendruck im Wasser 212.
Sethos 199.
Sirene 403.
Sixtus IV. 55.
Snellius 113, 283.
Sommersonnenwende 8.
Sonne, Bewegung 7; Entfernung 31, 32, 329; Beschaffenheit 483.
Sonnenfackeln 484.
Sonnenflecken 153, 484.
Sonnentag 35.
Sonnenuhr 36.
Sosigenes 17.
Sothisperiode 16.
Spektralanalyse 465.
Spektroskop 478.
Spektrum 419 fg.
Spencer 406.
Spezifisches Gewicht 212 fg.
Spiegelteleskop 304.
Spiegelung 90 fg.
Spritzflasche 230.
Stabilität 139.
Stechheber 226.
Stereoskop 119.
Sternbilder 5.
Sternhaufen 335.
Sternspektra 489.
Sterntag 35.
Stevin 144, 150, 191, 205, 209.
Stimme 405.
Stimmgabel 387.
Stöße 369.
Stokes 433.
Strabo 343.
Strahlenbrechung, atmosphärische 47.
Stundenwinkel 34.
Sturm 390.
Swan 474.
Sympathische Töne 388.

T.

Tagbogen 6.
Talbot 473.
Tartinische Töne 370.
Taschenuhr 180.
Taucherglocke 275.
Taylor 368.
Thales 20, 21, 39.
Theodorich 426.
Theodoros von Samos 18.
Tierkreis 8.
Titius 336.
Tonhöhe 367.
Torricelli 165, 193, 245 fg.
Torricellischer Versuch 246.
Toscanelli 57.
Trabanten 332.
Tretmühle 236.
Triangulation 284.
Tychonisches System 72.
Tyndall 382.

U.

Uhr 171.
Undulationstheorie 443.
Uranienburg 66.

V.

Ventil 228.
Venusdurchgang 329.
Vergrößerungsglas 106.
Vitello 426.
Vitruvius 202.
Viviani 162.
Vogel 488.
Vokale 407.

W.

Wage 126.
Wallenstein 77.
Wallis 193.
Walther 55.
Wasserbarometer 261.
Wasserdruck 210.

Digitized by Google

Waſſerräder 240.
Waſſerſchnecke 131.
Waſſeruhr 171.
Waſſerwellen 371.
Weber 373.
Wellenbewegung 371 fg.
Wellenlänge des Lichtes 450.
Weltpol 6; Wanderung 39.
Wheatſtone 407.
Widderpunkt 9.
Willis 407.
Winde 249.
Windmühle 236.
Winterſonnenwende 8.
Wren 193, 308.

X.

Ximenes 51.

Y.

Young 447, 450.

Z.

Zauberbecher 226.
Zeiteinteilung 15.
Zenit 14.
Zentrifugalkraft 186.
Zerſtreuung des Lichtes 418.
Zungenpfeifen 404.
Zurückwerfung der Wellen 382; des Schalles 384; des Lichtes 90 fg.; vollſtändige 114.

Digitized by Google

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY

ASTOR, LENOX AND
TILDEN

Digitized by Google

THE NEW YORK
PUBLIC

Digitized by Google

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS.

Digitized by Google

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY

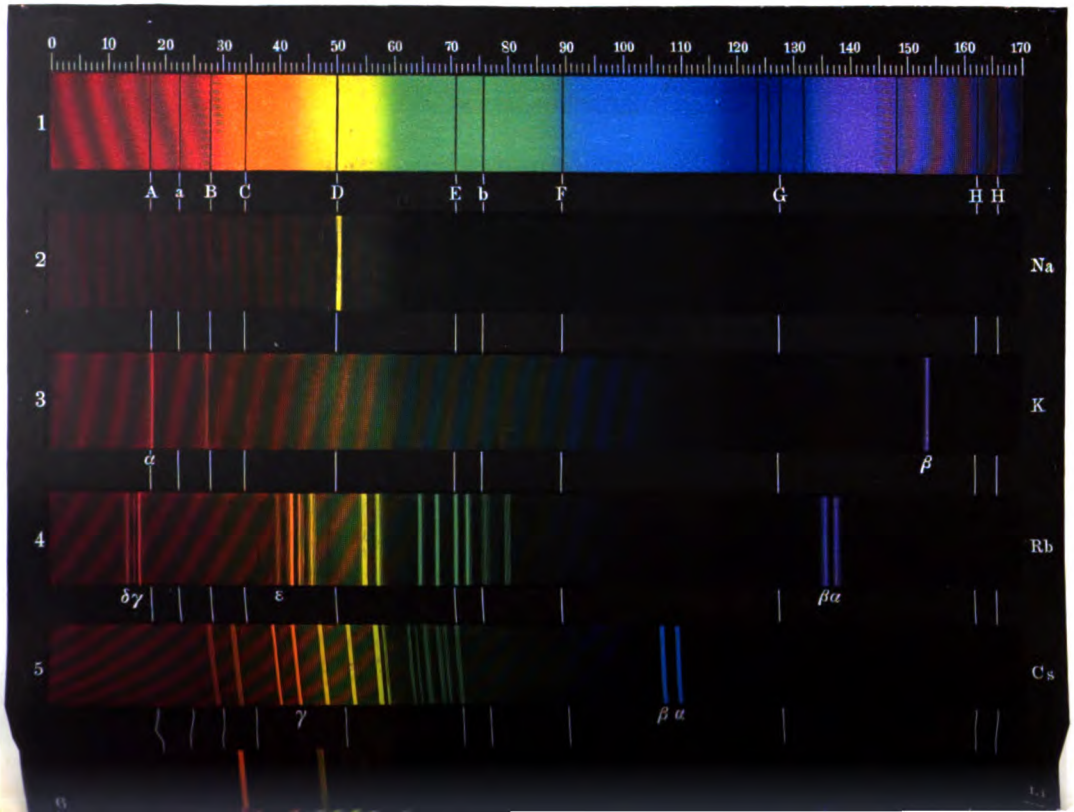
Digitized by Google

NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS.

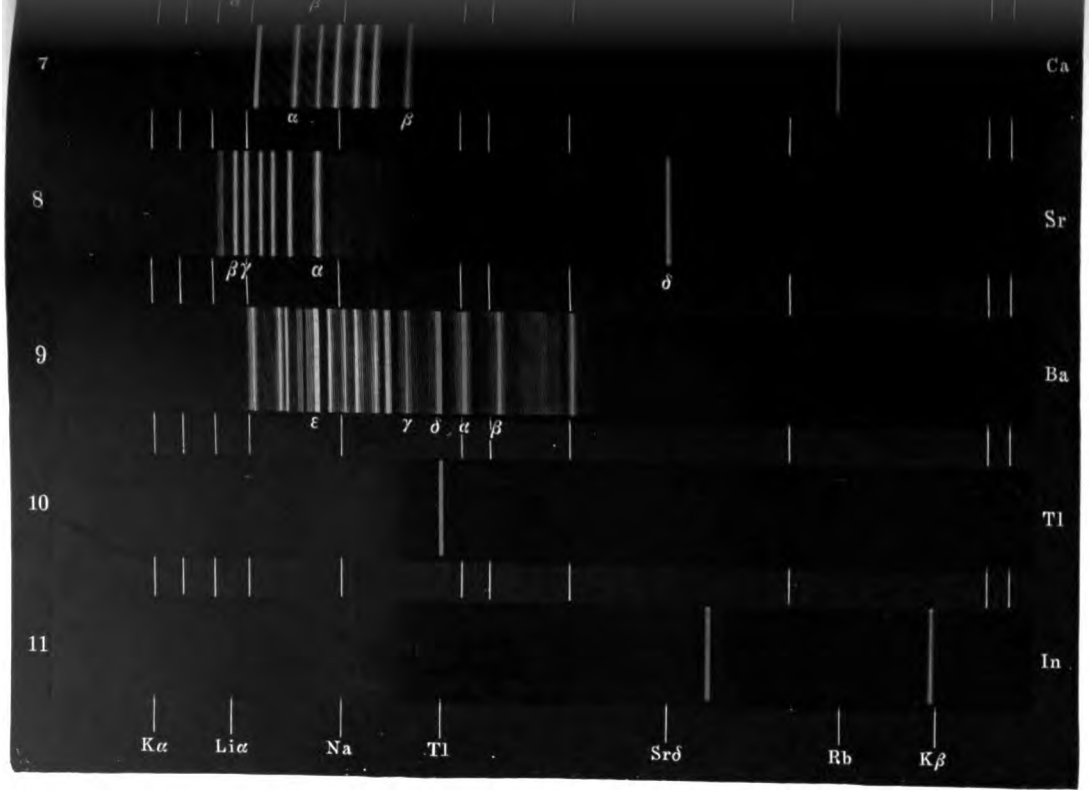
Digitized by Google

Spektraltafel

nach der Originalzeichnung von Bunsen und Kirchhoff.



Digitized by Google



La Cour u. Appel, Historische Physik. 1.

Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig.

Digitized by Google

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS.

Digitized by Google

Die Physik

auf

Grund ihrer geschichtlichen Entwickelung

für

weitere Kreise in Wort und Bild dargestellt

Zweiter Band

Digitized by Google

Digitized by Google

Die Physik

auf

Grund ihrer geschichtlichen Entwickelung

für

weitere Kreise in Wort und Bild dargestellt

von

Paul La Cour und **Jakob Appel**

Autorisierte Übersetzung

von

G. Siebert

Zweiter Band

Mit 380 in den Text eingedruckten Abbildungen und
vier Kartentafeln

Braunschweig
Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn
1905

56

Digitized by Google

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
534374
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS.
R 1912 L

Digitized by Google

Inhalt.

§§ 1—189. **Die Wärme.** Seite

Wärmeempfindung und Wärmemessung 3
Dampf 52
Die Natur der Wärme 125
Wärmestrahlen 131
Wärmeleitung 152
Die Natur der Wärme 162
Mechanische Wärmetheorie 183

§§ 190—250. **Der Magnetismus.**

Magnetismus; Deklinationsnadel 191
William Gilbert 200
Erdmagnetismus 216

§§ 251—303. **Die Elektrizität bis 1790.**

Die Reibungselektrizität 251

§§ 304—408. **Der elektrische Strom.**

Galvanismus 315
Die Natur der Stoffe 334
Elektromagnetismus 382
Thermoelektrizität 394
Das Ohmsche Gesetz 396
Induktion 404
Volta. Oersted. Faraday 414
Akkumulatoren 421
Erzeugung von Wärme und Licht durch den elektrischen Strom . . . 423
Elektrische Entladungen in verdünnter Luft 429
Telegraphie und Telephonie 439

§§ 409—455. **Das Wetter.**

Bis zur Erfindung des Barometers 455
Meteorologische Instrumente 457
Klima 467
Erklärungen 470
Auf- und niedersteigende Luftströmungen 476

Digitized by Google

Systematische Übersicht über den Inhalt des zweiten Teils.

(Die Zahlen geben die Seitenzahlen an.)

Die Wärme.

Ausdehnung durch die Wärme: Luftarten 6, 34—38; Flüssigkeiten 7, 32—34; Wasser 34; feste Körper 27—32.

Messung der Temperatur und der Wärmemenge: Luftthermometer 9, 10—12, 35, 136—137; Flüssigkeitsthermometer 11—12, 19—26; Metallthermometer 31; Thermosäulen 141—143; Kalorimeter 50.

Veränderung des Aggregatzustandes: Schmelzen und Gefrieren 39, 184; Änderung des Volums beim Schmelzen 39—40, 185; Schmelzpunkt 41; Schmelzpunkt und Druck 42, 185; Unterkühlung 42; Verdampfung und Verdichtung 52, 72, 186—197; Änderung des Volums bei der Dampfbildung 53—56; Sieden 48, 83; Destillation 340; Verflüssigung der Luftarten 342; kritische Temperatur 343—344.

Spezifische Wärme, latente Wärme: Spezifische Wärme 48—52; Schmelzwärme 45—48; Kältemischungen 41; Verdampfungswärme 74—79; Eismaschine 77—78.

Dampf: Dampfdruck 53—60, 186; Papinscher Topf 63; Messung des Dampfdruckes 81—89; Wirkung des Kondensators 88—89; Unterschied von Dampf und Gas 343, 351; Dampfmaschine 55, 57—60, 63—71, 89—99; Messung der Arbeit der Dampfmaschinen (Indikator) 99—104; Pferdekraft 99; Dampfkessel 119—122; Dampfschiff 105—115; Schiffsschraube 112—115; Dampfwagen 115—124.

Fortpflanzung der Wärme: Strahlende Wärme 131—152; Strahlungsgleichgewicht 133—135; Ausstrahlung 134—138; Absorption 138—139; Ausstrahlung in verschiedener Richtung 139—140; Wärmespektrum 144—147; Diathermanie 147—148; Strahlung der Lichtquellen 148; Strahlung der Sonne 149—150; Wärmeleitungsvermögen 152—153, 155—158; stationärer Zustand 153—154, 156; Wärmeleitungsvermögen und Temperatur 158; Sicherheitslampe 158; Kochen in Heu 160; Eishaus 161; Wärmeleitung der Erde 161.

Die Natur der Wärme: Versuche, die Wärme zu wiegen 126; Wärme als Bewegung 128—131; Carnots Kreisprozeß 162—167; Wärmeenergie 168—171, 172—177; mechanisches Wärmeäquivalent 171—183; mechanische Wärmetheorie 182—187.

Digitized by Google

Der Magnetismus.

Der Magnetstein: Anziehende Kraft des Magnetsteins 191—192; der Magnetstein als Richtungsnadel 193.

Deklination: Die Richtungsnadel 192—196; Pole der Richtungsnadel 196—197; Abweichung der Nadel vom Meridian 197—199, 201—202, 215—221; Deklinationskarte 204, 226—231; tägliche Änderung der Deklination 220, 243—244; säkulare Änderung 231—233; Kompaß 194—196, 246—248.

Inklination: Inklinationsnadel 198—203; Inklinationskarte 233; Änderung der Inklination 234.

Erdmagnetismus: Die Erde als Magnet 202, 218—222, 242; die magnetischen Pole 226; Intensität des Erdmagnetismus 234; Wirkung der Erde auf die Magnetnadel 210; magnetische Observatorien 241; magnetisches Gewitter 243.

Künstliche Magnete: Magnetisierung des Stahls 193, 211—213; weiches Eisen und Stahl 211; Koerzitivkraft 211—212; Struktur des Magneten 208, 211; vollständige Magnetisierung 213; Aufbewahrung des Magneten 215.

Wirkung der Magnete aufeinander: Anziehung und Abstoßung 196—197; magnetische Verteilung 205—208; Fernewirkung der Pole 208—210.

Die Elektrizität.

Elektrizitätsquellen: Elektrizität durch Reibung 251—253; Elektrisiermaschinen 254, 262—266, 288—289; Elektrophor 303; Influenzmaschine 304; Berührungselektrizität 321; Voltasche Säule 325; galvanische Elemente 326—328, 380—382; Elektrizität durch Wärme 394—396; Induktionselektrizität 404—407; Magnetinduktion 406—408; Voltainduktion 407; magnetelektrische Maschinen 408—410; das elektrodynamische Prinzip 411; Dynamomaschinen 410—414.

Statische Elektrizität: Elektrische Anziehung und Abstoßung 251, 252, 255, 260; zwei Arten von Elektrizität 261—262; gute und schlechte Leiter 257—260; elektrische Verteilung 274—277, 281—282, 298, 300—302; die Leidener Flasche 265—268, 271—273; Franklinsche Tafel 269; Elektrizität der Wolken 279—280; Blitzableiter 283—286; Wirkung der Spitzen 276—278; Sitz der Elektrizität auf einem Leiter 293—295; Potential 296—298; Kapazität 298; elektrische Kraftlinien 299; dielektrische Körper 302; Meßapparate für statische Elektrizität 265, 290—293, 321, 323; elektrische Theorien 270, 276.

Elektrische Entladung: Der elektrische Funken 256, 263, 279, 306—310; Dauer des Funkens 307; der Blitz 279; Energie der elektrischen Entladung 309; physiologische Wirkungen der Entladung 266, 268, 280, 310; tierische Elektrizität 310.

Der elektrische Strom: Strom der Voltaschen Säule 328—330; Richtung des Stroms 330—331, 333—334; Stromstärke 373, 388, 400; Stromteilung 403; elektromotorische Kraft 327, 333, 395—400; Spannungsunterschied 401, 414; Spannungsverlust 402; Leitungswiderstand 397—399; Leitungsvermögen 403; Ohmsches Gesetz 396—403.

Die Natur der Stoffe: Grundstoff 336, 338—339, 346, 350, 353, 360—362; Atom, Atomgewicht 337—338, 360—364; Molekül, Molekulargewicht 362—364; Säuren, Basen, Salze 364—366; Wertigkeit 365; Affinität 366; Destillation

Digitized by Google

340, 344; Verflüssigung der Gase 341—344; kritische Temperatur 343; Metallverwandlung, Goldmacherei, Stein der Weisen 346—350; Phlogistontheorie 355; Versuche von Cavendish, Priestley und Lavoisier 355—360.

Elektrochemie: Chemische Wirkung des Stromes 328—331, 367—382; Versuche von Faraday und das elektrolytische Gesetz 371—374; Wanderung der Jonen 375—377; Galvanoplastik und Galvanostegie 377—378; Anwendung der Elektrolyse in der Industrie 378—379; konstante Elemente 380—382.

Akkumulatoren: 421—422.

Thermoelektrizität: 394—396.

Elektromagnetismus: Oersteds Entdeckung 383—386; Multiplikator 387—388; Tangentenbussole 389; Elektromagnet 392—394; elektrische Schelle 394; Ampères Untersuchungen über die gegenseitige Einwirkung elektrischer Ströme 389—391; Solenoide 391; Ampères Theorie des Magnetismus 392.

Induktion: Magnetinduktion 404—406; Voltainduktion 407; Lenzsches Gesetz 408; Ruhmkorffscher Apparat 429—430; Selbstinduktion 430; magnetelektrische Maschinen 410; Dynamomaschinen 412—414.

Erzeugung von Wärme und Licht durch den elektrischen Strom; Joulesches Gesetz 423—424; Arbeitswert des Stromes 425—426; Glühlampe 424; Bogenlampe 427; Kurzschluß 424.

Elektrische Entladung in verdünnter Luft: Faradays Untersuchungen 431; Geißlersche Röhren 431; Anodenlicht, Kathodenlicht 431—432; Kathodenstrahlen 432—434; Röntgenstrahlen 436—438.

Telegraphie und Telephonie: Sömmerings elektrischer Telegraph 439; Nadeltelegraph 442; Zeigertelegraph 443; Telegraphenzeichen 441; Telegraphieren mit einfacher Leitung 441; Schreibtelegraph 443—445; Telegraphenleitung 446; Funkentelegraphie 447; Phonotelegraphie 447—448; Reissches Telephon 449; Bells Telephon 450; Mikrophon 451.

Das Wetter.

Meßinstrumente: Barometer 457—459; Thermometer 460; Hygrometer 462—463; Regenmesser 465; Windmesser 466; selbstregistrierende Instrumente 467.

Klima: T. Brahes meteorologische Beobachtungen 456—457; tägliche und jährliche Änderung der Wärme 468—469; Verteilung der Wärme auf der Erde 469; Verteilung des Luftdruckes 469; Passatwind und Monsun 470—472; Antipassat 472.

Wetter und Wetteränderung: Alte Wetterregeln 455—457; alte Theorien 470—472; Buijs-Ballotsches Gesetz 472—476; Gleichgewicht der Luft 476; auf- und niedersteigende Luftströmungen 476—486; Wirbelwinde 479—481; Wetterkarten 474—475; Wolken 477, 482; Regen 477; Schnee 484; Hagel 480; Ringe und Nebensonnen 485.

Digitized by Google

Die Wärme.

Digitized by Google

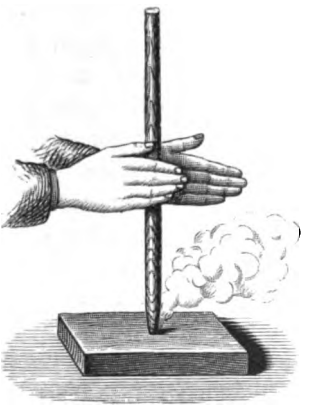
Digitized by Google

Wärmeempfindung und Wärmemessung.

§ 1. Wie die Geschichte der Entdeckungen berichtet, haben so gut wie alle Völker von jeher die Kunst „Feuer zu machen" verstanden. Hierzu sind auch nur sehr einfache Hilfsmittel erforderlich, nämlich trockenes Holz, welches durch Reibung zum Glühen gebracht wird.

Durch Fig. 1 wird ein Verfahren veranschaulicht, welches bei den Südseeinsulanern bis in die neueste Zeit in Gebrauch gewesen ist. Ein zugespitzter

Fig. 1.



Feuermachen bei den Südseeinsulanern.

Fig. 2.

Mexikanischer Feuerreiber.

Stab aus trockenem Holz wird auf einer hölzernen Unterlage gerieben. Die Unterlage besteht aus hartem, der Stab aus weicherem und leicht entzündlichem Holz. Geübte Südseeinsulaner sollen diesen Apparat mit solcher Geschicklichkeit zu gebrauchen verstehen, daß die Spitze des Holzstabes in wenigen Sekunden in Brand kommt.

Anstatt eines einfachen Holzstabes wurde bei vielen Völkern ein Feuerbohrer benutzt, der entweder mit den Händen (Fig. 2) oder vermittelst einer Schnur oder eines Riemens (Fig. 3 a. f. S.) in Bewegung gesetzt wurde. Durch die letztere Art der Bewegung wird eine sehr kräftige Wirkung erzielt, was erforderlich ist, wenn man nicht die geeigneten Holzarten hat. Bei den

Digitized by Google

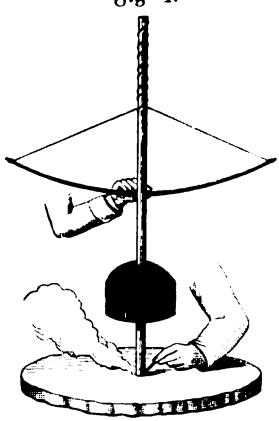
Indianern in Amerika hat man einen sehr praktischen Drillbohrer gefunden. der in Fig. 4 abgebildet ist. Eine Schnur ist in der Mitte am Schaft des

Fig. 3.

Feuerbohrer der Eskimo.

Bohrers und mit den Enden an einem 3 Fuß langen Bogen befestigt. Am unteren Teil des Schaftes ist ein schwerer Ring befestigt. Wenn nun die Schnur um den Schaft gewickelt und dann der Bogen nach unten bewegt wird, so wickelt sich die Schnur ab und der Bohrer wird in rasche Drehung versetzt. Ist die Schnur vollständig abgewickelt, so dreht sich der Bohrer infolge der Trägheit des schweren Ringes weiter, die Schnur wickelt sich wieder auf (nach der entgegengesetzten Seite) und der Bogen wird gehoben. Wenn er seine ursprüngliche Höhe erreicht hat, wird er von neuem nach unten gedrückt u. s. w. Diese Bewegung wird solange fortgesetzt, bis Funken auftreten, vermittelst deren man ein Stück Feuerschwamm entzünden kann.

Fig 4.



Indianischer Feuerbohrer.

§ 2. Ebenso wie die Kunst des Feuermachens seit undenklichen Zeiten bei allen Völkern bekannt war, ebenso allgemein hat das Feuer seit den ältesten Zeiten in den Naturanschauungen der Völker eine wichtige Rolle gespielt. Im Feuer machen sich göttliche Kräfte geltend. Das Feuer der Sonne und der Sterne, sowie das Feuer des Blitzes sind göttlichen Ursprungs. Zahlreiche Erzählungen berichten darüber, wie verbreitet diese Anschauung war. Am bekanntesten ist die Sage von Prometheus, der das Feuer den Göttern raubte und den Menschen gab und diese im Gebrauche desselben unterwies. Andere Sagen berichten,

Digitized by Google

daß das Feuer den Göttern gestohlen und in einem hohlen Stück Holz oder in einem Stein verborgen wurde. Daher kann das Feuer durch Reiben eines Stückes Holz an einem anderen oder durch Aneinanderschlagen zweier Steine erzeugt werden. In diesen Sagen erscheint das Feuer als Bestandteil verschiedener Körper, also als etwas Stoffliches.

§ 3. Es unterliegt kaum einem Zweifel, daß das Feuer seine älteste Anwendung bei der Zubereitung der Speisen gefunden hat. Fleisch wurde am Spieß gebraten, und Suppe in Ton- und Steingefäßen durch Hineinwerfen von heißen Steinen gekocht. Bei manchen Völkern hat man, als der Gebrauch von Axt und Säge noch nicht bekannt war, Bäume dadurch gefällt, daß man Feuer an den Stamm anlegte.

Viele von den Völkern des Altertums verstanden es jedoch auch, mit Hilfe des Feuers Metalle aus den Erzen zu gewinnen und die Metalle zu Waffen, Schmucksachen, Kochgefäßen und Werkzeugen zu verarbeiten. Hiermit legten diese Völker den ersten Grund zu ihrer Kultur. Mit Hilfe metallener Werkzeuge wurden sie tüchtige Ackerbauer, tüchtige Baumeister und tüchtige Techniker. Die Kenntnis der Wirkung des Feuers auf die Stoffe wurde ganz besonders durch den Gebrauch metallener Kochgeschirre gefördert. Ganz abgesehen von dem Einfluß dieser Gefäße auf die Entwickelung der Kochkunst und der Kunst der Bereitung von Heilmitteln lieferten sie eine Menge Erfahrungen über die mit dem Namen Wärme bezeichnete Naturkraft.

§ 4. Wahrscheinlich ist es die Beschäftigung mit dem Ausschmelzen der Metalle gewesen, die zur Erfindung eines anderen Stoffes geführt hat, der in seiner Bedeutung für die Kultur und namentlich die Naturwissenschaften den Metallen zur Seite gestellt werden kann, nämlich des Glases. Sowohl die Chinesen als auch die Ägypter waren Meister in der Bereitung und kunstvollen Verarbeitung des Glases. Theben war jahrhundertelang der Sitz einer hochentwickelten Glasfabrikation. Von hier kam die Kunst zu den Phöniciern und den anderen Völkern der Mittelmeerländer. Die Griechen wurden mit derselben im fünften Jahrhundert v. Chr. bekannt.

Über die Erfindung des Glases durch die Ägypter besitzen wir keine zuverlässigen Nachrichten. Sie gehört der vorhistorischen Zeit an. Man kann aber mit ziemlicher Sicherheit annehmen, daß das Glas beim Goldausschmelzen erfunden worden ist. Das Gold wurde nämlich durch Zusammenschmelzen von goldhaltigem Sand mit Soda gewonnen, die sich in reichlicher Menge in den ägyptischen Seen fand. Die Soda bildete bei hinreichend hoher Temperatur mit dem Sand eine flüssige Masse, die man von dem im Schmelztiegel zurückbleibenden Gold abgießen konnte. Die flüssige Verbindung des Sandes mit der Soda erstarrt aber beim Erkalten zu einem durchsichtigen Stein, d. h. zu einer Art Glas.

§ 5. Werkzeuge und Meßinstrumente aus Metall und Glas sind heutzutage bei allen praktischen und wissenschaftlichen Arbeiten unentbehrliche Hilfsmittel. Auch heute sind Metall und Glas noch die äußeren Träger der Kultur, und daher bilden die Metallgewinnung und die Glasbereitung die

Digitized by Google

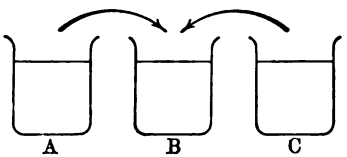
wichtigste Frucht der Beschäftigung der Völker des Altertums mit dem Feuer. Irgend ein Verständnis der Vorgänge der Metallgewinnung und der Glasbereitung hatten sie nicht. Die Arbeit wurde handwerksmäßig ausgeführt, und es mußten erst viel einfachere Vorgänge aufgeklärt werden, bevor es möglich war, das Wesen jener Prozesse zu erkennen.

§ 6. Wir wollen unsere Aufmerksamkeit zunächst nicht auf die umwandelnde und verzehrende Wirkung des Feuers, sondern nur auf die Wärme richten, welche in den Körpern entsteht, die in die Nähe des Feuers oder mit dem Feuer in Berührung kommen.

Die Sprache besitzt eine Reihe von Worten, die verschiedene Wärmezustände bezeichnen. Mit diesen Worten — heiß, warm, lauwarm, kühl, kalt — verbinden wir gewisse Vorstellungen, die von den Eindrücken herrühren, die man beim Berühren ungleich warmer Körper bekommt.

Unsere Gefühlsnerven geben uns jedoch keine zuverlässige Auskunft über den Wärmezustand eines Körpers. Es seien *A*, *B* und *C* (Fig. 5) drei Gläser, die beziehungsweise warmes, lauwarmes und kaltes Wasser enthalten. Taucht man einen Finger der einen Hand in das Wasser des ersten und einen Finger der anderen Hand in das Wasser des dritten Glases, so empfindet man im ersten Finger Wärme, im zweiten Kälte. Nimmt man jetzt die Finger aus dem warmen und dem kalten Wasser heraus und taucht sie in das lauwarme Wasser ein, so empfindet man im ersten Finger Kälte, im zweiten Wärme. Ein und dasselbe Wasser kann also gleichzeitig den Eindruck der Wärme und den Eindruck der Kälte hervorbringen. Die Empfindung, welche ein gewisser Eindruck hervorbringt, wird sehr wesentlich von dem Eindruck beeinflußt, dem der Nerv unmittelbar vorher ausgesetzt war.

Fig. 5.



Wärmeempfindung und Wärmezustand.

Dasselbe gilt von dem Sehnerven. Das Licht einer Petroleumlampe erscheint blendend hell, wenn man aus einem dunkeln Zimmer kommt, dagegen matt, wenn man aus dem Sonnenlicht kommt.

§ 7. Der Wärmezustand eines Körpers macht sich aber in dem Körper selbst bemerkbar. Es ändert sich nämlich sein Volum, wenn er erwärmt oder abgekühlt wird. Dies ist in besonders hohem Grade bei der Luft der Fall, was bereits Heron von Alexandria bemerkt hatte (I, § 202).

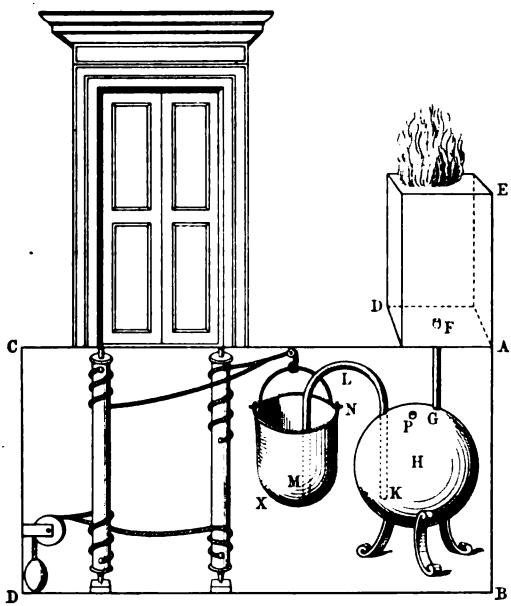
Er beschreibt in seinem Buche über Wasser- und Luftkunst eine Vorrichtung zum Öffnen und Schließen einer Tür (Fig. 6), die darauf beruht, daß sich die Luft ausdehnt, wenn sie erwärmt wird, und zusammenzieht, wenn sie abgekühlt wird.

AED ist ein Altar in einem Tempel in Alexandria. Er bildet einen luftdicht verschlossenen Kasten, dessen oberste Platte aus Metall besteht. Vom Boden des Kastens führt ein Rohr *FG* nach dem Behälter *H*, der durch das U-förmige Rohr *KLM* in Verbindung mit dem Eimer *X* steht. Dieser

Digitized by Google

hängt an einem Seil, welches über eine Rolle nach zwei Achsen geht, deren jede einen Flügel der Tempeltür dreht. Der Behälter *H* ist zur Hälfte mit Wasser gefüllt. Wenn nun auf dem Altar Feuer angezündet wird, so wird die Luft in dem Hohlraum des Altars erwärmt. Sie dehnt sich infolge der Erwärmung aus und treibt einen Teil des Wassers durch das Rohr *L* in den Eimer *X*. Dieser wird so schwer, daß er nicht nur die Türflügel drehen, sondern auch das Gewicht heben kann, welches die Tür zu schließen strebt. Wird das Feuer ausgelöscht, so kühlt sich die Luft ab und zieht sich zusammen, das Wasser strömt aus dem Eimer zurück in den Behälter *H* und die Tür wird durch die Wirkung des Gegengewichtes geschlossen.

Fig. 6.



Herons Vorrichtung zum Öffnen und Schließen einer Tür.

Heron hat noch mehrere andere Apparate konstruiert, die durch abwechselndes Erwärmen und Abkühlen einer abgesperrten Luftmenge bewegt wurden. Man darf daher annehmen, daß Heron mit der Ausdehnung der Luft durch die Wärme bekannt war. Ob er wußte, daß auch die flüssigen und die festen Körper durch die Wärme ausgedehnt werden, ist zweifelhaft, da die Ausdehnung dieser Körper bedeutend geringer ist als die Ausdehnung der Luft. Aus seiner Schrift geht auch nicht hervor, daß er sich bewußt gewesen ist, in der Türöffnungsvorrichtung ein Instrument zu besitzen, welches den Wärmezustand oder, wie man heute sagt, den Wärmegrad oder die Temperatur der Luft angibt. Erst 1700 Jahre später führte das Werk Herons zur Entdeckung des Thermometers.

§ 8. In der langen Zwischenzeit machte die Kenntnis der ausdehnenden Wirkung der Wärme keine nennenswerten Fortschritte. Heron benutzte bei seinen zahlreichen mechanischen Apparaten außer erhitzter Luft auch Dampf als bewegende Kraft. Er konstruierte, wenn man will, die erste Dampfmaschine, über die später etwas eingehender berichtet werden wird.

In einem Werke über Mechanik, welches der Araber Al Khazini 1137 geschrieben hat, findet sich eine Angabe, die vielleicht darauf hindeutet, daß der Verfasser die Ausdehnung des Wassers durch die Wärme gekannt hat. Das

Digitized by Google

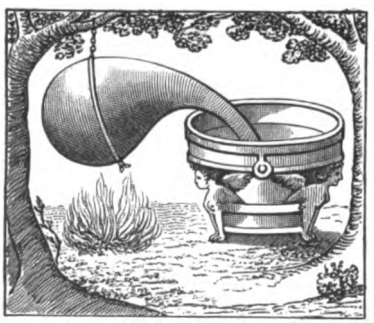
Werk heißt „Wage der Weisheit“ und handelt von einer äußerst empfindlichen Wage, mit der der Verfasser sehr genaue Bestimmungen spezifischer Gewichte gemacht hat. In einem Abschnitt behandelt er das Wasser und macht nicht nur darauf aufmerksam, daß sich das spezifische Gewicht des Wassers nach dem Salzgehalt richtet, sondern er führt auch als Ergebnis seiner Wägungen an, daß das Wasser im Winter in der Kälte schwerer ist, als im Sommer in der Wärme. Man hat hieraus schließen wollen, daß die Araber die Wasserwage als Thermometer benutzt haben. Etwas sicheres ist jedoch hierüber nicht bekannt und jedenfalls hat die Beobachtung Al Khazinis für spätere Zeiten keine Bedeutung gehabt.

§ 9. Um das Jahr 1600, als Herons Buch über Luft- und Wasserkunst eifrig gelesen wurde, erregte namentlich seine Beobachtung über die Ausdehnung der Luft durch die Wärme großes Interesse.

Della Porta (I, § 102) gab eine Schrift heraus, in der er nicht nur zeigt, daß sich die Luft beim Erwärmen ausdehnt, sondern auch, wie sich die Größe der Ausdehnung messen läßt. Sein Verfahren ist fast genau dasselbe, welches Cornelius Drebbel (1572 bis 1634) in einer 1604 erschienenen Schrift beschreibt.

Drebbel bediente sich bei seinem Versuch eines birnförmigen Metallgefäßes mit einem gebogenen Hals, dessen Mündung in Wasser eingetaucht wurde (Fig. 7). Das Gefäß wurde erwärmt, so daß ein Teil der eingeschlossenen Luft in Form von Blasen durch das Wasser hindurch austrat. Wenn sich dann das Gefäß abkühlte, so zog sich die zurückgebliebene Luft zusammen und das Wasser stieg im Hals empor. Je stärker das Gefäß erwärmt wurde, desto mehr Luft wurde ausgetrieben und desto mehr Wasser trat in das Gefäß, während es sich abkühlte, ein. So konnte Porta messen, um wieviel sich die Luft ausgedehnt hatte.

Fig. 7.



Drebbels Apparat.

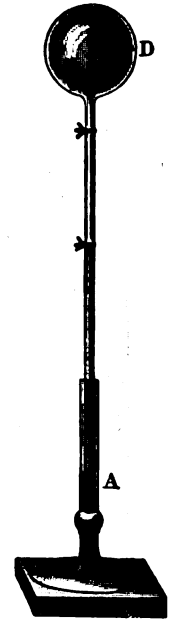
Diese Versuche beweisen eigentlich nur, daß Porta und Drebbel das Werk Herons gelesen hatten. Man hat mit Unrecht Drebbel die Ehre zuschreiben wollen, zuerst den Gedanken gehabt zu haben, den Wärmegrad der Luft durch die Ausdehnung derselben zu messen. Diese Ehre gebührt unstreitig Galilei (I, § 138), wenn auch die Möglichkeit zugegeben werden muß, daß Drebbel annähernd um dieselbe Zeit wie Galilei selbständig auf denselben Gedanken gekommen ist.

§ 10. Als Galilei 1592 Professor in Padua wurde, war er, wie aus seinen Briefen hervorgeht, mit dem Studium der Werke Herons beschäftigt und er wurde höchst wahrscheinlich durch dieses Studium zur Erfindung des Thermometers angeregt. Sein Schüler und Biograph Viviani erzählt, gegen

Digitized by Google

Ende des Jahres 1592 habe Galilei das Thermometer erfunden, ein Glas mit Luft und Wasser, welches dazu dienen sollte, ungleiche und veränderliche Wärmegrade zu beobachten. Obwohl Galilei selbst diese wichtige Entdeckung in seinen Schriften nicht erwähnt, wissen wir doch, daß er das Thermometer während seines Aufenthaltes in Padua benutzt hat. Pater Castelli (I, § 232) erwähnt nämlich in einem Brief, daß er 1603 Galilei den folgenden Versuch habe ausführen sehen. Er nahm eine Glaskugel von der Größe eines Hühnereies, an die ein Glasrohr angeschmolzen war, welches eine halbe Elle lang und so weit wie ein Strohhalm war. Er nahm die Glaskugel zwischen seine Hände, wodurch sie erwärmt wurde, und dann stellte er das Rohr mit dem Ende in ein Gefäß, in welchem etwas Wasser enthalten war (Fig. 8). Während sich die Kugel abkühlte, zog sich die abgesperrte Luft zusammen und das Wasser erhob sich in dem Rohr eine viertel Elle über den Wasserstand im Gefäß. Pater Castelli fügt hinzu, Galilei habe diese Erscheinung benutzt, um ein Instrument zu verfertigen, welches Wärme und Kälte anzeigen könne.

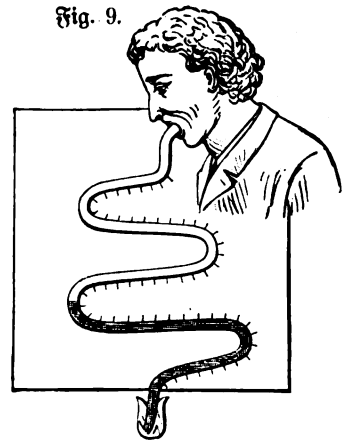
Fig. 8.



Galileis Luftthermometer.

§ 11. Galileis Thermometer hat jedoch den großen Mangel, daß es nicht nur die Änderung der Temperatur, sondern zugleich auch die Änderung des Luftdruckes anzeigt. Bei steigendem Luftdruck steigt das Wasser im Rohr und bei abnehmendem Luftdruck sinkt es. Allein trotz dieses Mangels fand das Instrument weite Verbreitung, wozu namentlich der Arzt Sanctorius beitrug, der von 1611 bis 1624 Professor in Padua war, und in dessen Vorlesungen zahlreiche Zuhörer aus allen Ländern zusammenströmten. Sanctorius führte das Thermometer und einige andere physikalische Meßinstrumente, z. B. das Pendel und die Wage, in die Heilkunde ein. Das Thermometer benutzte er namentlich, um die Temperatur von Fieberkranken zu messen. Der Kranke nahm die Thermometerkugel zwischen die Hände oder, wenn das Instrument dazu eingerichtet war, in den Mund (Fig. 9).

Fig. 9.



Sanctorius' Krankenthermometer.

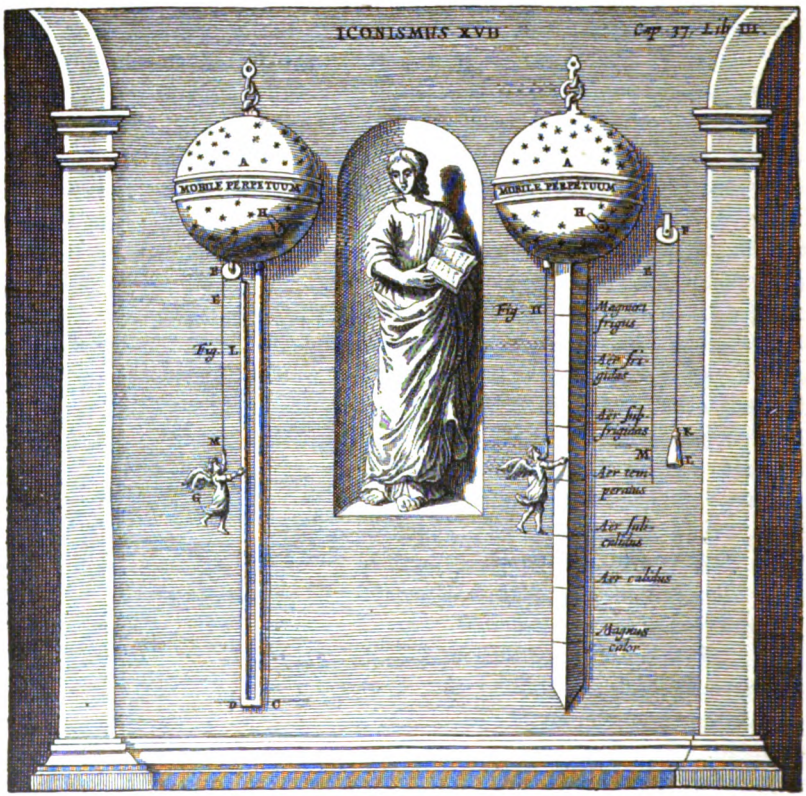
Sanctorius benutzte ein Galileisches Thermometer, um zu untersuchen, ob das Mondlicht wärme oder nicht. Mit einem großen Hohlspiegel warf er die Strahlen der voll beleuchteten Mondscheibe auf die Thermometerkugel und

Digitized by Google

fand, daß die Flüssigkeit im Thermometerrohr um zwei Teilstriche sank, während der Puls zehn Schläge machte, während die Sonnenstrahlen, in derselben Weise auf die Kugel geworfen, während zweier Pulsschläge die Wassersäule um 110 Teilstriche herabdrückten. Dies Resultat ist jedoch nicht zuverlässig, da zur Ermittelung der Mondwärme viel empfindlichere Instrumente erforderlich sind. Aber es ist immerhin interessant, wie Sanctorius das Thermometer zu den verschiedensten Zwecken zu benutzen verstand.

Galilei war so von seinen astronomischen Beobachtungen in Anspruch genommen, daß er keine Zeit fand, sich mit dem Thermometer zu beschäftigen,

Fig. 10.



Guerickes „Mobile perpetuum“.

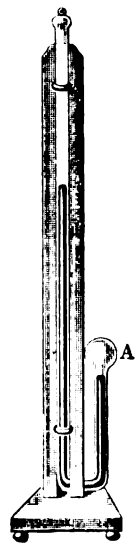
aber er fand doch, daß es außerordentlich schwer war, zwei in ihren Angaben übereinstimmende Thermometer anzufertigen. Dies kann nur dann der Fall sein, wenn sie beide genau dieselbe Gestalt und Größe haben, wenn sie aus derselben Sorte Glas bestehen und dieselbe Luftmenge enthalten. Außerdem muß der Luftdruck bekannt sein und mit in Rechnung gezogen werden.

§ 12. Das Lufttthermometer kam in Europa alsbald allgemein in Ge-

Digitized by Google

brauch. Otto v. Guericke gab ihm die aus Fig. 10 ersichtliche Form. *A* ist eine kupferne Hohlkugel, mit der ein U-förmiges kupfernes Rohr *BC* von sieben Ellen Länge verbunden ist. Die Luft in der Kugel wird durch Eingießen von Spiritus in das Rohr abgesperrt, so daß der Apparat nun ein Luftthermometer ist. Wenn sich die Kugel erwärmt, so dehnt sich die Luft aus und drückt die Flüssigkeit in dem äußeren Rohr in die Höhe. Wenn sich dagegen die Kugel abkühlt, so vermindert sich das Volum der Luft und die Flüssigkeit steigt in dem inneren Rohr. Um die Bewegungen der Flüssigkeit sichtbar zu machen, brachte Guericke in dem äußeren Rohr einen Schwimmer an, der am Ende einer Schnur befestigt war. Diese Schnur ging über eine Rolle und trug am andern Ende die Figur eines Engels, der mit ausgestreckter Hand auf eine mit Inschriften versehene Skala deutete. Die Skala war auf einem hölzernen Gehäuse angebracht, in welchem das Rohr eingeschlossen war. Der ganze Apparat wurde an einer nach Norden gewendeten Mauer aufgehängt, um ihn der direkten Einwirkung der Sonnenstrahlen zu entziehen. Hier konnte man die von dem Engel gezeigte Angabe der jeweiligen Temperatur ablesen. Natürlich mußte die Skala der Bewegung des Schwimmers angepaßt werden. Die Bedeutung der einzelnen Skalenteile war etwas unbestimmt. Guericke gibt die Regel, daß der Engel in der nebeligen kalten Nachtluft ungefähr in der Mitte der Skala schweben muß. Um eine solche Einstellung zu ermöglichen, ist an der Kugel ein Hahn *H* angebracht, durch den man Luft in die Kugel einblasen oder aus der Kugel heraussaugen kann, bis der Engel auf die richtige Stelle der Teilung deutet. „Übrigens", sagt Guericke, „wird die Erfahrung dies (die Einstellung) besser und besser zu machen lehren."

Fig. 11.



Das offene Luftthermometer.

Der Apparat erregte großes Aufsehen. Man beobachtete namentlich mit großem Interesse, daß der Engel beständig in Bewegung war. Guericke hatte die Kugel blau bemalt, mit goldenen Sternen verziert und mit der Inschrift „Mobile perpetuum" versehen.

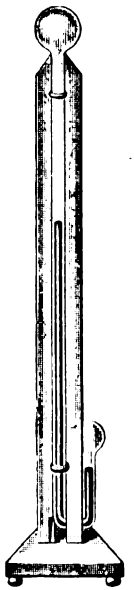
§ 13. Eine bedeutende Verbesserung erfuhr das Galileische Thermometer durch einen Freund Guerickes, den Jesuiten Kaspar Schott (1608 bis 1666). Die gewöhnliche Form des Thermometers war die aus Fig. 11 ersichtliche. Die große Kugel *A* enthält Luft, die durch die Flüssigkeit abgesperrt ist. Der längere Schenkel des gebogenen Rohres ist am oberen Ende offen. Wenn die Kugel erwärmt wird, so steigt die Flüssigkeit, wenn sie abgekühlt wird, so sinkt die Flüssigkeit im offenen Schenkel.

Schott änderte dieses Thermometer so ab, daß seine Angaben nicht durch den äußeren Luftdruck beeinflußt wurden. Dies erreichte er dadurch, daß er auch den zweiten Schenkel des Rohres schloß. In dieser Form (Fig. 12 a. f. S.) hat das Instrument später den Namen Differentialthermometer erhalten, weil

Digitized by Google

es sich sehr gut zur Messung von Temperaturdifferenzen eignet. Wird z. B. die obere Kugel erwärmt, indem man sie den Sonnenstrahlen aussetzt, während die untere die Temperatur der umgebenden Luft beibehält, so sinkt die Flüssigkeit im langen Rohr und man erhält ein vom Luftdruck unabhängiges Maß für die Erwärmung.

Fig. 12.



Schotts geschlossenes Luftthermometer.

Aber auch wenn beide Kugeln gleich stark erwärmt oder abgekühlt werden, gibt das Schottsche Differentialthermometer einen Ausschlag. Die Luft in der unteren Kugel ist nämlich infolge des Druckes der Flüssigkeitssäule dichter als die Luft in der oberen Kugel und dehnt sich daher mit größerer Kraft aus als diese. Doch ist selbstverständlich die Verschiebung der Flüssigkeit nicht so stark wie im offenen Thermometer.

Außer Schott haben einige andere Forscher im 17. Jahrhundert selbständig dieselbe Verbesserung des Galileischen Luftthermometers vorgenommen. Das Differentialthermometer hat später bei den Untersuchungen über die Wärmestrahlung eine wichtige Rolle gespielt.

§ 14. Es ist nicht bekannt, wer zuerst die Frage aufgeworfen hat, ob sich auch die Flüssigkeiten und die festen Körper ausdehnen, wenn sie erwärmt werden. Galilei sagt allerdings, es sei nach Aussage der Philosophen erwiesen, daß die Wärme ausdehnend, die Kälte dagegen zusammenziehend wirke, allein er teilt nichts darüber mit, inwiefern dies auch für andere Körper als die Luft gilt. Die Ausdehnung des Wassers ist viel schwieriger zu beobachten als die Ausdehnung der Luft, da die letztere achtmal so groß wie die erstere ist.

Wahrscheinlich war der französische Arzt Jean Rey (gest. 1645) der erste, der die Ausdehnung des Wassers zum Messen der Temperatur benutzte. Er schrieb im Jahre 1631 an den bekannten Pater Mersenne (I, § 171) einen Brief, in welchem er mitteilt, er bediene sich eines Thermometers, welches von dem sonst allgemein gebräuchlichen abweiche. Es besteht aus einem kleinen runden Glasgefäß mit einem langen sehr engen Hals. Das Gefäß ist bis an den Hals mit Wasser gefüllt. Soll nun die Temperatur eines Fieberkranken gemessen werden, so bekommt dieser das Gefäß in die Hand. Die Wärme dehnt das Wasser aus und dieses steigt in dem engen Hals in die Höhe. Je wärmer die Hand ist, desto höher steigt das Wasser.

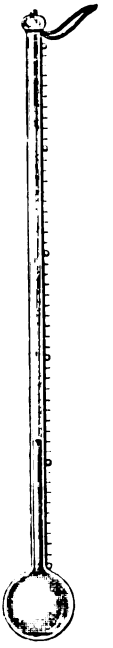
§ 15. Ob diese klare Beschreibung Reys in weiteren Kreisen bekannt geworden ist, weiß man nicht. Aber 10 Jahre später finden wir in Florenz ähnliche und bessere Thermometer, die nach Vivianis Bericht vom Großherzog Ferdinand II. von Toskana (1610 bis 1670) erfunden worden sind.

Dieser Fürst sowie sein Bruder Leopold von Medici beschäftigten sich eifrig mit den Naturwissenschaften und sammelten einen Kreis ausgezeichneter

Digitized by Google

Gelehrter um sich. Ferdinand war ein Schüler Galileis und hat das Luftthermometer, welches er 1641 in ein Flüssigkeitsthermometer umwandelte, vielleicht durch Galilei selbst kennen gelernt. Sein Thermometer bestand aus einem Glasgefäß von der Größe einer Büchsenkugel, an welches ein enges Rohr angeschmolzen war (Fig. 13). Die Kugel wurde mit gefärbtem oder ungefärbtem Spiritus gefüllt, das Rohr luftdicht verschlossen und mit einer Teilung versehen. Der Apparat hat große Ähnlichkeit mit dem Reyschen Thermometer, besitzt aber doch einige wesentliche Vorzüge vor diesem. Erstens ist er geschlossen und daher ist die Menge der eingeschlossenen Flüssigkeit immer dieselbe. Sodann hat der Spiritus vor dem Wasser den Vorzug, daß er sich stärker ausdehnt und daß er sehr niedrige Temperaturen erträgt, ohne zu erstarren. Anderseits hatte das Thermometer denselben Mangel wie das Luftthermometer. Die Skala war willkürlich und die Angaben verschiedener Instrumente waren nicht vergleichbar, wenn diese nicht in allen Einzelheiten vollkommen übereinstimmten.

Fig. 13.



Flüssigkeitsthermometer des Großherzogs Ferdinand.

Großherzog Ferdinand benutzte sein Thermometer bei seinen Versuchen künstlicher Ausbrütung von Hühnereiern, die er im Großen betreiben wollte, was ihm jedoch nicht gelang. Aus 144 Eiern bekam er nur drei lebensfähige Hühnchen. Mit besserem Erfolg wandte er sein Thermometer zu meteorologischen Beobachtungen sowie zur Beobachtung der Temperatur in tiefen Kellern und Brunnen zu verschiedenen Jahreszeiten an.

Einen großen Aufschwung nahmen die Beobachtungen über die Wirkungen der Wärme vermittelst des Thermometers durch die Tätigkeit der berühmten Accademia del Cimento.

§ 16. Die Accademia del Cimento (Akademie des Versuches) wurde am 19. Juni 1657 in Florenz von Schülern Galileis und Torricellis unter dem Vorsitze des Fürsten Leopold gestiftet. Bereits 1648 hatte Großherzog Ferdinand eine Gesellschaft gestiftet, die sich mit der Anstellung physikalischer Versuche beschäftigen sollte. Die ersten Mitglieder der Akademie hatten dieser Gesellschaft angehört und waren bekannte und tüchtige Forscher. Der Wahlspruch der Gesellschaft war „Provando e Riprovando“, und sie sollte ein lebendes Denkmal für Galilei sein, der sich durch Einführung des Versuches in die Naturforschung um diese wie kein anderer verdient gemacht hatte.

In der Akademie sollte selbständige Forschung betrieben, die Zeit aber nicht durch nutzlose und spitzfindige Auslegung des Aristoteles und anderer alter Autoren vergeudet werden. Die Natur selbst sollte befragt werden, welche stets die richtige Antwort gibt.

Digitized by Google

Die Anzahl der Mitglieder war nur neun, aber diese waren sämtlich hervorragende Gelehrte. Sie arbeiteten gemeinsam, und was von ihren Untersuchungen veröffentlicht wurde, erschien nicht unter dem Namen der einzelnen Mitglieder, sondern als gemeinsame Arbeit der Akademie.

Das Tagebuch der Akademie, aus welchem man ersehen kann, welchen Anteil die einzelnen Mitglieder an den Arbeiten derselben genommen haben, wird noch heute in Florenz aufbewahrt. Trotzdem ist es auch jetzt noch üblich, nicht die Namen der einzelnen Mitglieder, sondern die Akademie zu nennen, wenn von den Arbeiten derselben die Rede ist.

Dieser ausgezeichneten Akademie war jedoch nur eine kurze Lebensdauer beschieden. Fürst Leopold, der die äußere tragende Kraft der Akademie war, sollte vom Papst 1667 zum Kardinal ernannt werden, und zwar unter der Bedingung, daß die Akademie aufgelöst werde. Dies ist aber schwerlich der einzige Grund für die Auflösung gewesen. Auch innere Streitigkeiten zwischen den Mitgliedern haben dabei mitgewirkt. Ludwig XIV. von Frankreich hatte Viviani besonders ausgezeichnet und reich beschenkt. Dies erweckte den Neid der übrigen Mitglieder und führte zu einem heftigen Streit zwischen Borelli und Viviani, an dem sich auch der Großherzog und Fürst Leopold beteiligten. Die Einigkeit und das Gefühl der Zusammengehörigkeit waren geschwunden und damit auch die Lebenskraft der Akademie, so daß die Bedingung, an welche der Papst die Verleihung des Kardinalshutes an den Fürsten Leopold geknüpft hatte, nur die äußere Veranlassung bildete, daß die Akademie wirklich aufgelöst wurde. Der Bericht über die Arbeiten der Akademie erschien im Jahre 1667 unter dem Titel „Saggi di naturali sperienze fatte nel Accademia del Cimento“ kurz vor der Auflösung der Akademie. Eine neue Ausgabe der Saggi wurde 1841 auf Kosten des Großherzogs Leopold II. von Toskana hergestellt. Der Herausgeber Antinori bemerkt treffend, die Akademie sei wie eine unglückliche Mutter nach der Geburt ihres ersten Kindes gestorben.

§ 17. Aber während der 10 Jahre ihres Bestehens hat die Akademie eine Reihe von Arbeiten geliefert, die grundlegend für die experimentierende Naturwissenschaft geworden sind, und die durch die Art, wie sie ausgeführt sind, Muster wissenschaftlicher Forschung bilden. Und wenn es die Mitglieder der Akademie auch nicht verstanden haben, Mißgunst und Streit aus ihrem Kreise fernzuhalten, so nehmen sie dennoch in der Geschichte der Wissenschaft eine ehrenvolle Stellung ein.

Der älteste und zugleich der am wenigsten bedeutende von ihnen war Alessandro Marsili (geb. 1601). Er hat wahrscheinlich nicht viel zu den gemeinsamen Arbeiten beigetragen. Er starb um 1670.

Etwas jünger als Marsili war der hochbegabte, aber leidenschaftliche Giovanni Alfonso Borelli (geb. 1608). Er hat eine große Anzahl mathematischer, astronomischer, physikalischer und physiologischer Abhandlungen verfaßt. Er hat den Gedanken klar ausgesprochen, daß die Bewegung der Himmelskörper durch gegenseitige Anziehung derselben bedingt wird. Er

Digitized by Google

wandte das Hebelgesetz auf die Bewegung des Menschen und der Tiere an. Auch auf verschiedenen anderen Gebieten lieferte er wichtige Arbeiten. Er erkannte, daß sich die Kometen in paraboliſchen Bahnen um die Sonne bewegen. Auch die Kapillaritätserscheinungen hat er eingehend studiert. Er weigerte sich aber, die Ergebnisse seiner Untersuchungen in den Abhandlungen der Akademie veröffentlichen zu lassen, da er sie unter seinem Namen herausgeben wollte. Sie erschienen erst im Jahre 1670, als die Akademie nicht mehr bestand. Borelli reiste 1668 nach Messina, wo er früher Professor der Mathematik gewesen war. Hier beteiligte er sich 1674 an einem Aufstand und mußte infolgedessen flüchten. Er begab sich nach Rom und lebte hier in großer Dürftigkeit. Die Königin Christine von Schweden, welche in Rom wohnte, nahm sich seiner an und ließ sein Werk über die Bewegung der Tiere auf ihre Kosten drucken. Borelli starb 1679.

Carlo Renaldini (1615 bis 1698) war Ingenieur im Dienste des Papstes gewesen, bevor er Mitglied der Akademie wurde. Er war ein ausgezeichneter Forscher, der sich namentlich durch Beobachtungen über die Wärme verdient gemacht hat. Nach Auflösung der Akademie war er Lehrer der Mathematik in Padua.

Candido del Buono und sein Bruder Paolo del Buono entstammten einem alten berühmten florentiniſchen Geschlecht. Sie waren beide, ebenso wie ein dritter Bruder, Anton Maria, der nicht Mitglied der Akademie war, Schüler Galileis. Candido (1618 bis 1676) hat eine Anzahl Meßinstrumente erfunden, darunter eine Wasseruhr, welche sehr genau ging, und einen Apparat zur Bestimmung des Druckes in komprimierter Luft. Paolo (1625 bis 1662) war eigentlich nur korrespondierendes Mitglied. Er ging nämlich bereits 1655 nach Österreich, wo er kaiserlicher Mathematiker und Direktor der Münze in Wien wurde. Von hier sandte er regelmäßig Briefe an den Fürsten Leopold, in denen er über Neuheiten auf dem Gebiete der Physik berichtete.

Vincenzio Viviani, Sohn eines florentiniſchen Patriziers, war vielleicht der bedeutendste von den neun Akademikern. Er war ein hochbegabter Mathematiker und hatte schon als Knabe, noch ehe er Schüler Galileis wurde, den Euklid studiert. Als Galilei 1642 starb, war Viviani 20 Jahre alt. Er war an den Untersuchungen Torricellis beteiligt, die zur Erfindung des Barometers führten, und wurde Torricellis Nachfolger als Mathematiker des Großherzogs. Gemeinsam mit D. Cassini (I, § 282) leitete er große Ingenieurarbeiten, namentlich Wasserbauten. Der Nachwelt hat er einen großen Dienst durch seine Biographie Galileis erwiesen. Er wurde Mitglied der Royal Society und der französischen Akademie. Eine Pension, die ihm von Ludwig XIV. verliehen wurde, verwendete er größtenteils, um das Haus Galileis zu einem Denkmal für den großen Meister umzugestalten, indem er eine Büste desselben an demselben anbrachte und die Wände mit Reliefs schmückte, durch welche die Entdeckungen Galileis verherrlicht wurden.

Digitized by Google

Viviani starb 1703 im Alter von 81 Jahren und wurde an der Seite Galileis in Santa Croce begraben.

Auch Antonio Oliva war ein durch seinen Scharfsinn hervorragendes Mitglied der Akademie. Nach Auflösung derselben zog er nach Rom. Hier geriet er mit der Inquisition in Konflikt, und um sich der Tortur zu entziehen, machte er 1668 seinem Leben ein Ende, indem er sich aus dem Fenster seines Gefängnisses stürzte.

Francesco Redi (1626 bis 1694) war Philosoph und berühmter Arzt. Er starb als Leibarzt Cosmos III., des Sohnes Ferdinand II.

Der jüngste der neun Akademiker, Lorenzo Magalotti, geb. 1637 in Rom, kam 19 Jahre alt nach Pisa, wo er unter Viviani studierte. Im Jahre 1660 wurde er Sekretär der Akademie, eine Stellung, für die er sich besonders eignete, weil er nicht nur seine Muttersprache meisterhaft beherrschte, sondern auch Französisch, Spanisch und Englisch sprach und Arabisch und Türkisch verstand. Er wurde auch mit der Abfassung der Denkschriften der Akademie, der berühmten „Saggi“ betraut, in denen er über die Arbeiten der Akademie berichtete.

Fig. 14.

Lorenzo Magalotti.

§ 18. Außer den ordentlichen Mitgliedern hatte die Akademie auch einige korrespondierende Mitglieder, sowohl in Italien als auch im Auslande. Von diesen mögen D. Cassini und Nils Stensen oder Nikolaus Steno, wie er lateinisch genannt wurde, hervorgehoben werden. Stensen war 1638 in Kopenhagen geboren. Er studierte seit 1656 an der Universität seiner Vaterstadt Medizin. Zu seinen Lehrern gehörte der Anatom Thomas Bartholin, ein älterer Bruder Rasmus Bartholins (I, § 395). Im Jahre 1660 ging er nach Holland, welches damals mit den nordischen Reichen in regem Verkehr stand. In demselben Jahre machte er durch seine Sektionen mehrere anatomische und physiologische Entdeckungen. Im Jahre 1661 erschien seine erste Schrift über die Drüsen des Mundes, in der er sich als ein ausgezeichneter Forscher zu erkennen gibt. Im folgenden Jahre begann er seine epochemachenden Untersuchungen über das Herz, die zu dem Ergebnis führten, daß das Herz nur ein Muskel ist, der im wesentlichen ebenso wie die übrigen Muskeln wirkt. Als er sich 1664 in Familien-

Digitized by Google

angelegenheiten in Kopenhagen aufhielt, ging man damit um, ihm eine Profeſſur an der dortigen Univerſität zu übertragen, was jedoch eine Clique von Profeſſoren der Bartholinſchen Verwandtſchaft zu verhindern wußte. Stenſen ging wieder ins Ausland, und zwar über Amſterdam nach Paris

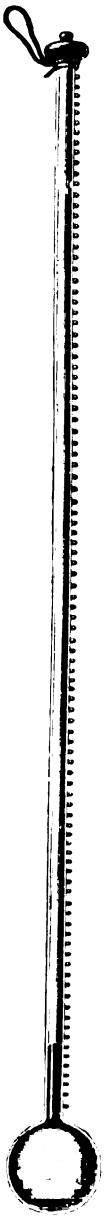
Fig. 15.

Nils Stenſen.

und von hier nach einjährigem Aufenthalt nach Florenz, wo er durch Borelli, an den er empfohlen war, in den Kreis der Accademia del Cimento eingeführt wurde. Er trat namentlich mit Viviani, Redi und Magalotti in regen Verkehr, und die Freundſchaft, welche er mit Magalotti ſchloß, iſt für

Digitized by Google

Fig. 16.



Florentiner 100teiliges Thermometer.

ihn von großer Bedeutung geweſen. In mancher Hinſicht bildete der eine von ihnen den Gegenſatz zum andern. Stenſen war der Sohn eines Handwerkers, Magalotti ſtammte aus einer alten ariſtokratiſchen Familie, Stenſen war ein ernſter, pflichterfüllter Charakter, der talentvolle Magalotti war in ſeinen Handlungen weniger ſkrupulös und von leidenſchaftlichem Ehrgeiz beſeelt. Aber trotz dieſer Verſchiedenheit waren ſie ohne Zweifel doch verwandte Naturen, die ſich eng aneinander anſchloſſen.

Stenſen erlangte durch Viviani Zutritt zum Hof und wurde, obwohl er Ketzer war, vom Großherzog als Arzt angeſtellt. Er wohnte in demſelben Hauſe mit Redi und verkehrte mit Borelli. Im Jahre 1666 hielt er ſich eine zeitlang in Rom auf, und in demſelben Jahre gab er eine Schrift über die Muskeln heraus, die dem Großherzog Ferdinand II. gewidmet war.

Im folgenden Jahre machte Stenſen große Anfechtungen und Seelenkämpfe durch. Er fühlte ſich in ſeinen kirchlichen Anſchauungen erſchüttert und fühlte ſich zur päpſtlichen Kirche hingezogen. Am 2. November 1667 entſchloß er ſich, zur katholiſchen Kirche überzutreten. Am folgenden Tage bekam er vom König von Dänemark einen Brief, durch den er aufgefordert wurde, nach Kopenhagen überzuſiedeln. Dieſe ehrenvolle Berufung kam leider zu ſpät, da er unter den obwaltenden Umſtänden nicht ohne weiteres ſeine Stellung in Florenz aufgeben konnte. Die folgenden Jahre waren der Bearbeitung einer Schrift gewidmet, durch die er den Grund zur Geologie legte. Die Schrift führt den Titel: „De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus“ und erſchien 1669 in Florenz. Nachdem er ein Jahr lang Europa bereiſt hatte und nach Florenz zurückgekehrt war, wurde er 1672 von neuem nach Kopenhagen berufen. Er leiſtete diesmal der Berufung Folge, allein ſein Aufenthalt in Kopenhagen dauerte nur anderthalb Jahre. Er kehrte Ende 1674 wieder nach Florenz zurück, da ihm religiöſe Verfolgungen den Aufenthalt in Kopenhagen verleideten. Seit dieſer Zeit beſchäftigte er ſich nicht mehr mit Naturwiſſenſchaften. Er wurde Geiſtlicher, lebte als apoſtoliſcher Vikar in Hannover und Hamburg und ſtarb 1686 in Schwerin in Mecklenburg.

§ 19. Magalotti ſtand als Sekretär der Accademia del Cimento mit der ganzen gelehrten Welt in Briefwechſel, und die Akademie bildete gewiſſermaßen den Brennpunkt, in dem die Strahlen der damaligen Naturwiſſenſchaften zuſammenliefen und eine große Wirkung hervorbrachten. Auf

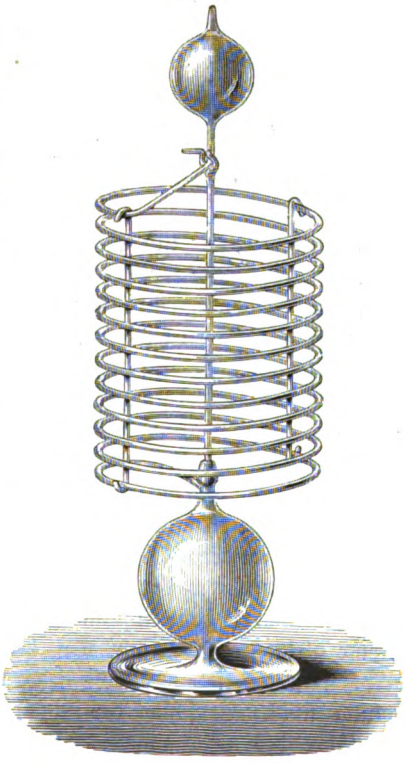
Digitized by Google

den Inhalt der „Saggi“, der in 13 Kapitel zerfällt, werden wir im Folgenden wiederholt zurückkommen.

Die Instrumente, mit denen die Akademie vorzugsweise experimentierte, sind das Thermometer, das Hygrometer und das Pendel.

§ 20. Das Thermometer der Accademia del Cimento war von derselben Art wie das Spiritusthermometer des Großherzogs Ferdinand. Ein ausgezeichneter Glasbläser, Moriani, fertigte die Röhren so genau an, daß die Angaben der verschiedenen Instrumente ziemlich gut übereinstimmten. Wahrscheinlich justierte er sämtliche Thermometer nach ein und demselben Normalthermometer. Das Rohr (Fig. 16) teilte er durch aufgeschmolzene Glasperlen, von denen jede zehnte aus weißer Emaille bestand, während die übrigen schwarz waren. In der Regel wurde die Röhre in 50 gleiche Teile (Grade) geteilt, zuweilen aber auch in 100 Teile, wenn die Röhre sehr lang war. Ja, die Akademie besaß Thermometer, deren Röhren in 300 bis 400 Teile geteilt waren. Die Röhre war bei diesen Instrumenten schraubenförmig gebogen (Fig. 17).

Fig. 17.



Florentiner 300- bis 400teiliges Thermometer.

Je enger und länger die Thermometerröhre war, desto schwieriger war es, mehrere übereinstimmende Thermometer herzustellen, während dies bei den 50teiligen Instrumenten weniger Schwierigkeiten machte.

Ein glücklicher Zufall hat es ermöglicht, diese alten Instrumente zu kontrollieren. Im Jahre 1829 fand nämlich Antinori in Florenz einen Kasten mit einer größeren Anzahl von 50teiligen Thermometern der Akademie. Der italienische Mathematiker Guglielmo Libri (1803 bis 1869) beobachtete die Angaben dieser Thermometer mit Rücksicht auf die in den „Saggi“ enthaltene Bemerkung, daß eins dieser Thermometer in eiskaltem Wasser $13^1/_2{}^0$, in der größten Sommerhitze aber 40^0 gezeigt habe.

Libri füllte nun eine der alten Röhren mit Weingeist, so daß es in Eiswasser $13^1/_2{}^0$ zeigte und fand, daß 50 Florentiner Grade gleich 44 Réaumurschen Graden waren. Der Nullpunkt des alten Thermometers lag also bei -15^0 R. Hierdurch sind wir in den Stand gesetzt, die Floren-

Digitized by Google

tiner Grade in Réaumursche Grade umzurechnen. Man hat auf diese Weise gefunden, daß die vom Großherzog Ferdinand in dem Zeitraum von 1654 bis 1670 aufgezeichneten Beobachtungen für die mittlere Temperatur von Florenz denselben Wert liefern wie die heutigen Beobachtungen.

§ 21. Die Accademia del Cimento beobachtete, wie gesagt, daß das Thermometer stets denselben Wärmegrad anzeigt, wenn es in Eiswasser eingetaucht wird, und es unterliegt kaum einem Zweifel, daß sich die Akademiker darüber klar waren, daß dies bedeutete, daß das Eis stets bei derselben Temperatur schmilzt. Aber sie haben, wie es scheint, die Schmelztemperatur des Eises nicht als festen Punkt für die Teilung benutzt.

Im Jahre 1661 erhielt die Royal Society in London ein Florentiner Thermometer, und Robert Boyle ließ sofort von seinem Assistenten ein ähnliches Instrument anfertigen. Bereits im Jahre 1664 rechnet er die Temperaturgrade vom Schmelzpunkt des Eises, d. h. von der Temperatur des Eiswassers aus.

Huygens, der mit der Royal Society in Briefwechsel stand, beschäftigte sich ebenfalls mit dem Thermometer und machte 1665 die wichtige Beobachtung, daß die Temperatur des siedenden Wassers ebenso wie die des schmelzenden Eises stets dieselbe ist. Hierdurch war ein zweiter fester Punkt für die Teilung gegeben. Um diese Beobachtung machen zu können, muß Huygens Quecksilber als Thermometerflüssigkeit benutzt haben, denn der Weingeist siedet bei einer noch niedrigeren Temperatur als das Wasser. Dies hat er möglicherweise von den Florentiner Akademikern gelernt, die bei manchen Untersuchungen Quecksilber statt Weingeist als Thermometerflüssigkeit benutzten. Nun waren die Angaben zweier Thermometer vergleichbar. Man markiert nämlich an beiden Thermometern den Stand der Flüssigkeit, wenn das Instrument in Eiswasser und wenn es in siedendes Wasser eingetaucht wird, und teilt dann den Abstand der beiden Punkte an beiden Instrumenten in eine gleich große Anzahl von Teilen.

Huygens selbst machte jedoch diese wichtige Anwendung seiner Beobachtung nicht. Er schlug der Royal Society vor, dem Volum der Kugel und der Röhre des Thermometers ein bestimmtes Verhältnis zu geben und dann die Grade entweder vom Eispunkt oder vom Siedepunkt aus zu zählen. „Man hat dann nicht nötig", schreibt er, „das Thermometer von einem Ort an einen anderen zu senden, um die beobachteten Wärmegrade zu vergleichen."

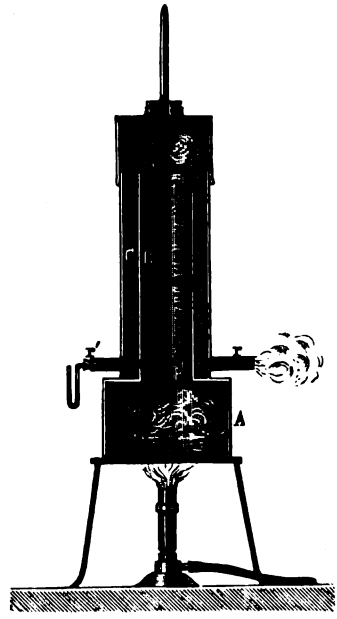
§ 22. Für die Wahl der festen Punkte wurden verschiedene Vorschläge gemacht. Der Franzose Dalencé schlug 1688 den Schmelzpunkt des Eises und den Schmelzpunkt der Butter vor, deren Abstand er in 20 Grade einteilte. — In demselben Jahre ermittelte Halley in offenen Thermometerröhren, um wieviel sich Quecksilber und Wasser ausdehnen, wenn die Röhre in siedendes Wasser eingetaucht wird. Er fand, daß das Quecksilber stets bis auf dieselbe Höhe steigt, d. h. daß das Wasser stets bei derselben Temperatur siedet. Dasselbe beobachtete er beim Weingeist. Er schlug daher vor, als

Digitized by Google

feste Punkte den Siedepunkt des Weingeistes und den Eispunkt zu benutzen.

Sechs Jahre später schlug Renaldini vor, als feste Punkte den Eispunkt und den Siedepunkt des Wassers für die Thermometerteilung zu benutzen, was auch seitdem allgemein geschieht. Man hat inzwischen gefunden, daß der Siedepunkt des Wassers etwas von der Beschaffenheit des Gefäßes abhängt, während der gebildete Dampf bei normalem Luftdruck stets dieselbe Temperatur hat. Um den Siedepunkt des Wassers an einem Thermometer zu markieren, bedient man sich eines Siedegefäßes von der aus Fig. 18 ersichtlichen Einrichtung. Das Thermometer ist von Dampf umgeben, ohne daß es mit dem Wasser in Berührung kommt. Über den Einfluß des Luftdruckes auf den Siedepunkt wird später die Rede sein.

Fig. 18.



Markierung des Siedepunktes.

§ 23. Aber trotz dieser und mancher anderer Vorschläge war es am Anfang des 18. Jahrhunderts schwierig, übereinstimmende Thermometer herzustellen. Noch im Jahre 1714 sprach Professor Chr. Wolf, Kanzler der Universität in Halle, seine Verwunderung über zwei übereinstimmende Thermometer aus, die er von Fahrenheit bekommen hatte.

Daniel Gabriel Fahrenheit war 1686 in Danzig geboren. Sein Vater sandte ihn 1701 nach Amsterdam, wo er sich zum Kaufmann ausbilden sollte. Seine Lieblingsbeschäftigung bildete aber die Physik. Er reiste mehrere Jahre lang zu seiner Ausbildung in England, Frankreich und Deutschland. Wegen seiner Geschicklichkeit in der Anfertigung feiner und übereinstimmender Thermometer wurde er von den Physikern überall gut aufgenommen.

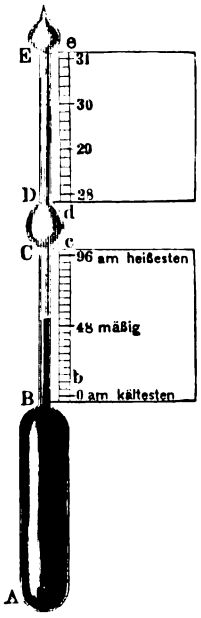
Anfangs verfertigte er Weingeistthermometer nach Florentiner Muster, später (1720) ging er zum Quecksilberthermometer über, um deren Verbreitung er sich verdient gemacht hat. Zur Herstellung der Teilung benutzte er drei feste Punkte, nämlich die Temperatur einer Kältemischung aus Eis, Wasser, Salmiak und Kochsalz, die niedrigste Temperatur, welche er kannte und die er daher mit 0 bezeichnete, die Temperatur des Eiswassers, die er mit 32 bezeichnete, und die Blutwärme des Menschen, die er im Mund oder in der Achselhöhle bestimmte und mit 96 bezeichnete. Die Temperatur des Eiswassers ist konstant, die beiden anderen genannten Temperaturen sind es nicht, und Fahrenheit benutzte den einen zur Kontrolle des anderen.

Fahrenheit benutzte also zur Herstellung der Skala nicht den Siede-

Digitized by Google

punkt des Waſſers, der nach ſeiner Teilung der Temperatur 212° entſpricht. Er hatte nämlich beobachtet, daß der Siedepunkt veränderlich iſt, daß er mit dem Luftdruck ſteigt und fällt. Dies veranlaßte ihn, ein Thermobarometer zu konſtruieren, vermittelſt deſſen er den Luftdruck beſtimmen konnte. Dieſer Apparat (Fig. 19) war unten, bis zum 96. Grad, in der gewöhnlichen Weiſe eingeteilt, oben aber mit Marken verſehen, die den Luftdruck in Zollen angaben. Der jeweilige Luftdruck wurde durch das Inſtrument angegeben, wenn es in ſiedendes Waſſer eingetaucht wurde.

Fig. 19.



Fahrenheits Thermobarometer.

Fahrenheit machte bei ſeinen Unterſuchungen verſchiedene bemerkenswerte Beobachtungen, die im Folgenden Erwähnung finden werden. Er brachte den größten Teil ſeines Lebens als Glasbläſer in Holland zu und ſtarb 1736.

Die Fahrenheitſche Thermometerſkala, bei der der Eispunkt mit 32 und der Siedepunkt mit 212 bezeichnet wird, fand weite Verbreitung und iſt jetzt noch in England und in Nordamerika allgemein in Gebrauch.

§ 24. In Mitteleuropa und in Skandinavien wurde die Fahrenheitſche Skala durch die Réaumurſche verdrängt.

René de Réaumur (1683 bis 1757), Mitglied der franzöſiſchen Akademie, bezeichnete den Eispunkt mit 0 und den Siedepunkt mit 80. Er verfertigte anfangs Weingeiſtthermometer, und ſein 80. Grad war urſprünglich der Siedepunkt des Weingeiſtes. Ein Weingeiſtthermometer kann den Siedepunkt des Waſſers nicht angeben. Réaumurs Thermometer waren bei weitem nicht ſo genau wie die Fahrenheitſchen. Erſt Deluc gelang es 1772 nach Renaldinis Vorſchrift, gute Queckſilberthermometer mit der Réaumurſchen Teilung zu verfertigen. Zur Herſtellung der Teilung benutzte er den Eispunkt und den Siedepunkt des Waſſers. Bei den heutigen Thermometern wird die Teilung über den Eispunkt hinaus nach unten fortgeſetzt. Die Grade unter dem Nullpunkt werden negative Grade oder Kältegrade genannt und durch ein Minuszeichen (—) von den poſitiven Graden (+) oder den Wärmegraden unterſchieden. So bedeutet —14° eine Temperatur von 14° unter dem Eispunkt.

§ 25. Die zweckmäßigſte Thermometereinteilung für wiſſenſchaftliche Zwecke iſt die hundertteilige Skala von Celſius. Anders Celſius war 1701 in Upſala geboren und wurde im Alter von 29 Jahren Profeſſor der Aſtronomie an der Univerſität in ſeiner Vaterſtadt. In Schweden exiſtierte damals kein Obſervatorium, und die Univerſität in Upſala beſaß nur wenige und dabei nicht ſehr zeitgemäße aſtronomiſche Meßinſtrumente. Celſius, der eine energiſche Natur war und der gern dazu beitragen wollte, daß ſein

Digitized by Google

Vaterland mit den übrigen Ländern auch in der Pflege der Wissenschaften gleichen Schritt halte, hatte sich, noch ehe er Professor wurde, ein Privatobservatorium eingerichtet, auf dem er regelmäßige astronomische und meteorologische Beobachtungen anstellte. Dies wurde die Veranlassung, daß die schwedische Regierung im Jahre 1740 das erste öffentliche Observatorium gründete. Nach seiner Ernennung zum Professor unternahm Celsius eine mehrjährige Reise in das Ausland und kam 1734 gerade zu der Zeit nach

Fig. 20.

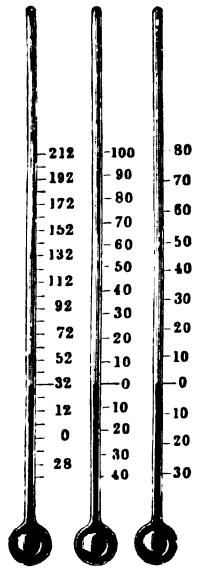
Anders Celsius.

Paris, als Bouger im Begriff war, zur Ausführung der Gradmessung nach Peru abzureisen (I, § 278). Celsius machte den Vorschlag, im Norden eine ähnliche Messung vorzunehmen. So veranlaßte er die von Maupertuis in Finmarken ausgeführte Gradmessung (I, § 279), an der er selbst im Auftrage der schwedischen Regierung teilnahm. — Eine andere Angelegenheit, für die er eifrig tätig war, war die Einführung des Gregorianischen Kalenders in Schweden, wo man damals noch nach dem Julianischen Kalender rechnete, während man in Dänemark bereits seit 1700 nach dem Gregorianischen Kalender rechnete. Celsius erlebte die Einführung des neuen Kalenders nicht. Diese erfolgte erst im Jahre 1753, nachdem Celsius bereits neun Jahre zuvor im Alter von 43 Jahren gestorben war. Während seiner kurzen

Digitized by Google

Lebenszeit widmete er alle seine Kräfte seinem Vaterlande und seiner Wissenschaft. Von seinen zahlreichen Arbeiten (er hat unter anderem nachgewiesen, daß die Schwere in London und Upsala verschieden ist, daß das Meer an der schwedischen Küste stetig sinkt) sollen hier seine „Beobachtungen über zwei beständige Grade eines Thermometers" (1742) hervorgehoben werden. In dieser Schrift bezeichnet er den Eispunkt mit 100, den Siedepunkt mit 0. Sein Instrument zeigte also bei steigender Temperatur abnehmende Grade. Er wollte auf diese Weise den Gebrauch negativer Zahlen zur Angabe niedriger Temperaturen umgehen, aber bereits 1750 änderte die schwedische Akademie auf den Vorschlag Martin Strömers (1707 bis 1770) die Celsiussche Skala in die jetzt gebräuchliche um, indem sie den Eispunkt mit 0 und den Siedepunkt mit 100 bezeichnete. Selbstverständlich wird die Skala unter 0 (negative Grade oder Kältegrade) und über 100 hinaus verlängert.

Fig. 21.



Die drei Thermometerskalen.

Bei der Vergleichung der drei Thermometerskalen von Fahrenheit (F), Réaumur (R) und Celsius (C) hat man zu beachten, daß der Eispunkt bei 32° F, 0° R oder 0° C liegt. Der Abstand des Eispunktes vom Siedepunkt ist also 180° F, 80° R oder 100° C. Also sind 9° F = 4° R = 5° C. Die Umrechnung der Angaben eines Thermometers in die eines anderen geschieht in der folgenden Weise.

Beispiel 1. 68° F sind 63 — 32 = 36° F über dem Eispunkt, also $\frac{36}{9} \cdot 4 = 16°$ R oder $\frac{36}{9} \cdot 5 = 20°$ C.

Beispiel 2. — 22° F sind 22 + 32 = 54° F unter dem Eispunkt, also $-\frac{54}{9} \cdot 4 = -24°$ R oder $-\frac{54}{9} \cdot 5 = -30°$ C.

Beispiel 3. — 8° R sind — 10° C oder $\frac{8}{4} \cdot 9 = 18°$ F unter dem Eispunkt, also 32 — 18 = 14° F.

§ 26. Das genaueste Thermometer ist das Lufthermometer, weil sich die Luft sowohl stärker als auch gleichmäßiger ausdehnt, als feste Körper und Flüssigkeiten. Allein das Lufthermometer ist unbequem und findet daher für gewöhnliche Temperaturbeobachtungen keine Anwendung. Die Flüssigkeitsthermometer können natürlich mit dem Lufthermometer verglichen und nach diesem geteilt werden. Die Flüssigkeit der gewöhnlichen Thermometer ist in der Regel Quecksilber. Bei sehr niedrigen Temperaturen kommen Weingeistthermometer zur Verwendung, da der Weingeist erst bei — 130° erstarrt. Auch andere Flüssigkeiten, z. B. Toluol und der sogenannte Petroläther, sind für die Her-

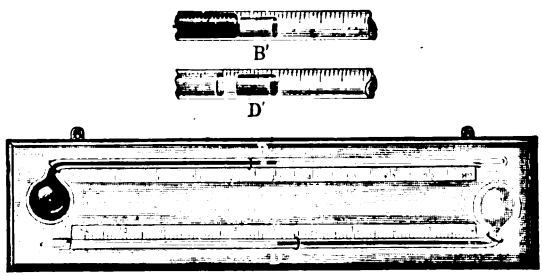
Digitized by Google

stellung von Thermometern empfohlen worden, die zur Messung sehr niedriger Temperaturen dienen sollen. Bei Temperaturen, die unter dem Erstarrungspunkte dieser Flüssigkeiten liegen, können nur Gasthermometer oder Widerstandsthermometer verwendet werden. Bei den letzteren wird die Temperatur aus der Veränderung des elektrischen Widerstandes (von Platin) abgeleitet.

Ein empfindliches Thermometer muß auch bei einer sehr geringen Erwärmung oder Abkühlung merklich steigen oder sinken. Dies wird dadurch erreicht, daß man der Röhre eine möglichst geringe Weite gibt. Damit aber die Quecksilbersäule deutlich zu sehen ist, gibt man dem Hohlraum der Röhre einen solchen Querschnitt, daß das Quecksilber nicht eine zylinderförmige Säule, sondern ein dünnes Band bildet.

Zur Beobachtung der höchsten und der niedrigsten Temperatur, die im Laufe eines Tages eintritt, benutzt man Maximum- und Minimumthermometer, deren es verschiedene Arten gibt. Ein Instrument, welches früher sehr verbreitet war, ist das in Fig. 22 abgebildete, welches 1794 von dem schottischen Arzt und Botaniker Daniel Rutherford (1749 bis 1819) vorgeschlagen wurde. Das Maximumthermometer ist ein gewöhnliches Quecksilberthermometer, in dessen Röhre vor dem Quecksilber ein Eisenstäbchen liegt. Wenn sich das Quecksilber ausdehnt, so wird das Stäbchen fortgeschoben, bleibt aber an der Stelle, wo es angekommen ist, liegen, sobald das Quecksilber anfängt, sich wieder zusammenzuziehen. Das Stäbchen bezeichnet also mit dem dem Quecksilber zugewendeten Ende die höchste Temperatur, welche das Thermometer im Laufe des Tages angezeigt hat.

Fig. 22.



Maximum- und Minimumthermometer.

Das Minimumthermometer ist ein Weingeistthermometer. Es liegt, wie aus der Figur zu ersehen ist, parallell neben dem Maximumthermometer und enthält ein kleines Stäbchen aus farbigem Glas. Dieses Stäbchen liegt im Weingeist und bleibt ruhig liegen, wenn sich dieser ausdehnt. Wenn sich dagegen der Weingeist zusammenzieht und mit der konkaven Oberfläche an dem Glasstäbchen ankommt, so wird das Stäbchen infolge der Oberflächenspannung von der Flüssigkeit mitgenommen und bleibt liegen, sobald die Flüssigkeit wieder anfängt, sich auszudehnen. Das Glasstäbchen zeigt also die niedrigste Temperatur an, die das Thermometer im Laufe des Tages angegeben hat.

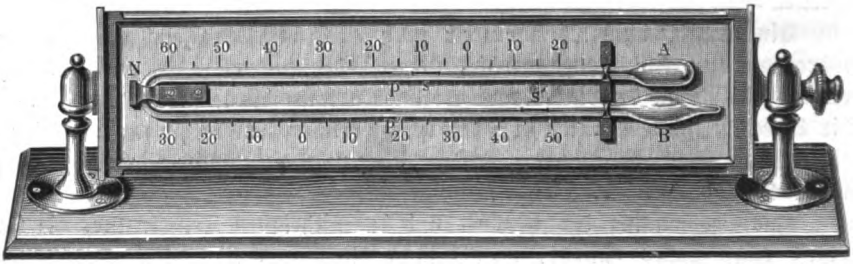
Wenn man im Laufe des Vormittags die Temperaturen des Maximums und des Minimums abgelesen hat, so dreht man das Brett, auf dem die

Digitized by Google

beiden Thermometer befestigt sind, so, daß die Quecksilberkugel nach unten, und die Weingeistkugel nach oben kommt.

Das Sixsche Maximum- und Minimumthermometer, welches in neuerer Zeit vielfach statt des Rutherfordschen benutzt wird, besteht aus einer ge-

Fig. 23.



Sixsches Maximum- und Minimumthermometer.

Fig. 24.

Fieber-thermo-meter.

bogenen Glasröhre ANB (Fig. 23), welche von A bis p mit Weingeist, von p bis p' mit Quecksilber, und von p' bis B mit Weingeist gefüllt ist, aber so, daß der letztere Raum nicht ganz mit Flüssigkeit angefüllt ist, sondern daß das Gefäß B eine Dampfblase enthält. Durch die Ausdehnung und Zusammenziehung des Weingeistes von A bis p wird der Quecksilberfaden hin- und hergeschoben. Von zwei Eisenstäbchen, die durch den Quecksilberfaden verschoben werden, zeigt das eine das Maximum, das andere das Minimum an. Bei vertikaler Stellung des Instrumentes werden die beiden Eisenstäbchen durch zwei federnde Glasfäden an die Röhrenwand angedrückt, um sie am Herabgleiten zu hindern. Die Eisenstäbchen müssen jeden Tag, am besten im Laufe des Vormittags, wenn das Minimum der letzten Nacht vorüber ist, aber das Maximum des laufenden Tages noch nicht eingetreten ist, vermittelst eines Magneten auf die Spitze der Quecksilbersäule zurückgezogen werden.

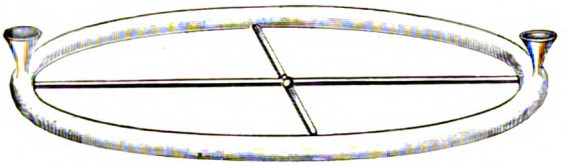
Das sogenannte Fieberthermometer, dessen sich die Ärzte bedienen, hat die aus Fig. 24 ersichtliche Einrichtung. In der Röhre befindet sich ein kurzer Quecksilberfaden, der von dem Quecksilber im Gefäß durch eine Luftsäule getrennt ist. Wenn sich das Quecksilber im Gefäß ausdehnt, so wird der Quecksilberfaden durch den Druck der Luftsäule verschoben, und wenn sich das Thermometer wieder abkühlt, so bleibt der Quecksilberfaden an der Stelle der höchsten Temperatur hängen, auf die das Thermometer erwärmt worden ist. Durch Schwingen des Instrumentes bringt man den Quecksilberfaden an die ursprüngliche Stelle zurück.

§ 27. Die Accademia del Cimento wies durch den Versuch

Digitized by Google

nach, daß sich auch die festen Körper unter dem Einfluß der Wärme ausdehnen. Daß sich z. B. das Glas ausdehnt, wenn es erwärmt wird, beobachteten sie vermittelst des gewöhnlichen Thermometers. Wenn sie nämlich der Thermometerkugel für einen Augenblick eine Flamme näherten, so sahen sie, daß die Flüssigkeit in der Röhre sank. Bei einer plötzlichen Erwärmung dehnt sich das Glas aus, bevor sich die Flüssigkeit erwärmt. Infolge der Vergrößerung des Gefäßes sinkt die Flüssigkeit. Einen Augenblick später steigt sie, da in-

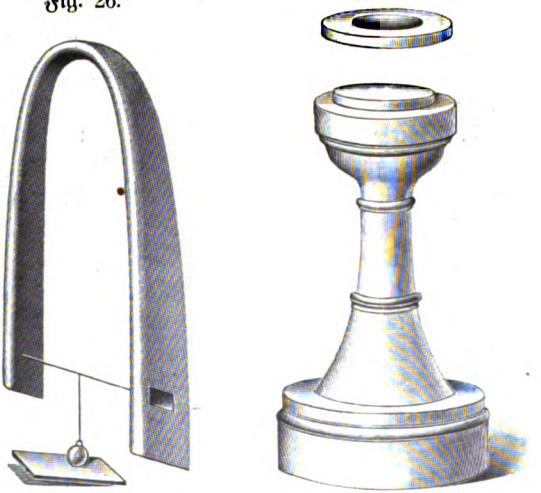
Fig. 25.



Ausdehnung des Glases durch die Wärme.

zwischen die Wärme durch das Glas hindurch in den Weingeist eingedrungen ist und dieser sich viel stärker ausdehnt, als das Glas. Um die Ausdehnung des Glases deutlicher zu machen, bediente sich die Akademie der in Fig. 25 abgebildeten Vorrichtung. Sie besteht aus einem hohlen Glasring und einem hölzernen Kreuz, welches dem Ring so angepaßt ist, daß es von diesem eben festgehalten wird. Wird dann der Ring mit warmem Wasser gefüllt, so dehnt er sich infolge der Erwärmung aus und das Kreuz fällt aus dem Ring heraus.

Fig. 26. Fig. 27.



Ausdehnung der Metalle durch die Wärme.

In Fig. 26 und 27 sind zwei in der „Saggi“ beschriebene Vorrichtungen abgebildet, welche dazu dienten, nachzuweisen, daß die Metalle ein ähnliches Verhalten wie das Glas zeigen. Die beiden Enden eines Holzbügels (Fig. 26) sind durch einen Draht verbunden. Eine an diesem Draht befestigte Schnur trägt eine Kugel, die dicht über einem Spiegel schwebt. Wird der Metalldraht erwärmt, so wird er länger, die Schenkel des Bügels gehen auseinander, die Kugel wird gehoben und ihr Spiegelbild zieht sich zurück. Durch den anderen Apparat wird die Ausdehnung eines Metallringes

Digitized by Google

veranſchaulicht. Das Stativ endet oben mit einem kleinen Zylinder, der genau in den abgebildeten Ring paßt. Wird dieſer aber erwärmt und dann um den Zylinder gelegt, ſo zeigt es ſich, daß er zu groß iſt.

§ 28. Dieſe Ausdehnung beim Erwärmen und Zuſammenziehung beim Abkühlen vollzieht ſich ſowohl bei flüſſigen, als auch bei feſten Körpern mit ungeheurer Kraft. Welchen praktiſchen Gebrauch man zuweilen von dieſer Kraft machen kann, ergibt ſich aus folgendem Beiſpiel. An einem Muſeumsgebäude in Paris hatten die Wände infolge des Druckes eines ſchweren Gewölbes nachgegeben und ſich nach außen geneigt. Molard, der Direktor des Muſeums, ließ die gegenüberliegenden Mauern durch eiſerne Stangen verbinden, die an der Außenſeite mit Schraubenmuttern verſehen waren (Fig. 28). Dieſe wurden feſt angezogen, nachdem die Stangen erwärmt worden waren und ſich infolgedeſſen ausgedehnt hatten. Als ſie ſich dann wieder abkühlten, zogen ſie ſich auf ihre urſprüngliche Länge zuſammen, und zwar mit ſolcher Kraft, daß die Mauern wieder in vertikale Stellung gebracht wurden.

Fig. 28.

Aufrichtung geneigter Mauern.

Für viele Berechnungen iſt es von großer Wichtigkeit, die Größe der Ausdehnung für eine beſtimmte Erwärmung genau zu kennen. Meſſungen zur Ermittelung dieſer Größe ſind daher in großer Anzahl ausgeführt worden.

Die franzöſiſchen Phyſiker Laplace und Lavoiſier haben gegen Ende des 18. Jahrhunderts die Längenausdehnung von Metallſtäben vermittelſt der durch Fig. 29 und 30 veranſchaulichten Vorrichtung beſtimmt. Zwiſchen vier ſoliden Steinpfeilern ſteht ein länglicher Trog aus Kupferblech. Zwiſchen zweien dieſer Pfeiler iſt an zwei horizontalen Stäben der vertikale Stab *b* befeſtigt. Gegen dieſen Stab ſtößt das eine Ende eines 6 Fuß langen Metallſtabes, der von zwei Querſtäben unterſtützt auf dem Boden des Troges ruht. Das andere Ende des Stabes ſtößt gegen den Hebelarm *c*, der an der drehbaren Achſe *d* zwiſchen den beiden anderen Steinpfeilern befeſtigt iſt. Dieſelbe Achſe trägt das Fernrohr *f*. Um mit dem Apparat einen Verſuch auszuführen, wird der Trog zunächſt mit Eiswaſſer gefüllt. Der Stab hat dann eine Temperatur von 0° und die dieſer Temperatur entſprechende Länge. Das Fernrohr iſt auf eine Skala gerichtet und das Fadenkreuz ſtellt ſich auf einen beſtimmten Teilſtrich ein. Dann wird der Trog mit ſiedendem Waſſer gefüllt. Infolge der Verlängerung des Metallſtabes dreht ſich das Fernrohr

Digitized by Google

und deutet auf einen anderen Teilstrich der Skala. Aus dieser Beobachtung ergibt sich durch eine einfache Berechnung, um wieviel sich der Stab infolge der Erwärmung ausgedehnt hat. Durch derartige Messungen hat man ge-

Fig. 29.

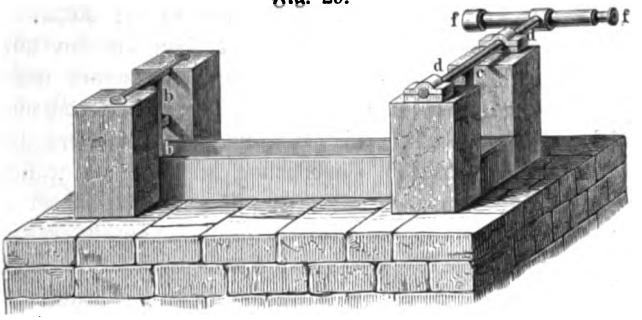
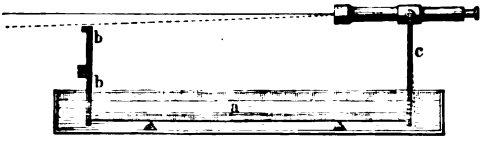


Fig. 30.



Messung der Längenausdehnung.

funden, daß die Verlängerung eines Stabes von 1 m Länge bei einer Erwärmung von 0° bis 100° in Millimetern beträgt:

Glas	0,8	Messing	1,9
Platin	0,9	Silber	1,9
Stahl	1,1	Zinn	2,0
Eisen	1,2	Blei	2,8
Gold	1,4	Zink	3,0
Kupfer	1,7		

Bei gewöhnlichen Temperaturen dehnen sich die Metalle gleichmäßig aus, d. h. die Ausdehnung ist für jeden einzelnen Grad dieselbe. Bei höheren Temperaturen dagegen ist die Ausdehnung stärker, als bei niedrigen Temperaturen. Selbstverständlich wirkt die Wärme nicht bloß in der Richtung der Länge, sondern in jeder Richtung ausdehnend. Dies kommt in Betracht, wenn es sich um die Zunahme des Volums handelt.

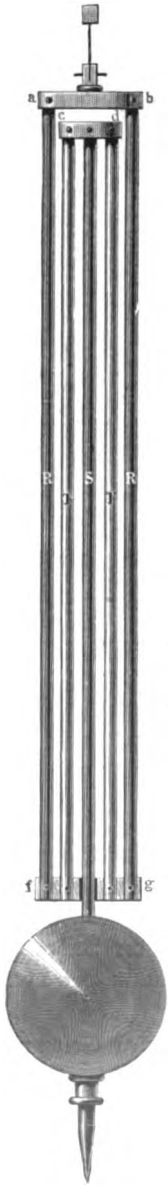
§ 29. Auf die Ausdehnung der Metalle muß bei sehr vielen Gelegenheiten Rücksicht genommen werden. Wenn der Schmied einen Reifen um ein Rad legt, so treibt er ihn im erwärmten Zustande auf. Wenn er sich dann abkühlt, schließt er sich fest an den Umfang des Rades an. Die Eisenbahnschienen werden so auf den Schwellen befestigt, daß zwischen je zwei Schienen ein kleiner Zwischenraum gelassen wird, damit Platz für die Ausdehnung der

Digitized by Google

Schienen vorhanden iſt. Eiſerne Brücken müſſen ſo konſtruiert ſein, daß die Ausdehnung in der Wärme und die Zuſammenziehung in der Kälte nicht gehindert wird.

Uhren, die durch das Pendel (oder die Unruhe) reguliert werden, gehen in der Wärme langſamer als in der Kälte. Zum Teil wird dies dadurch verhindert, daß die am unteren Ende der Pendelſtange angebrachte Linſe ſo am unteren Rande feſtgehalten wird, daß ſie ſich ungehindert nach oben hin ausdehnen kann. Die Verlängerung der Pendelſtange wird dann durch die Ausdehnung der Linſe ausgeglichen. Vollſtändig läßt ſich jedoch der ſtörende Einfluß der Wärme nur durch ein ſogenanntes Kompenſationspendel beſeitigen. Die gebräuchlichſte Form der Kompenſationspendel iſt das von John Harriſon 1726 erfundene Roſtpendel.

Fig. 31.



Roſtpendel.

Die Einrichtung des Roſtpendels iſt aus Fig. 31 erſichtlich. Die beiden Querſtäbe *ab* und *fg* ſind durch die beiden Eiſenſtäbe *R* verbunden. Der Querſtab *fg* trägt die beiden Zinkſtäbe *T*, die an ihrem oberen Ende durch den Querſtab *cd* verbunden ſind. An dieſem iſt der Eiſenſtab *S* befeſtigt, der an ſeinem unteren Ende die Pendellinſe trägt. Durch die Ausdehnung der drei Eiſenſtäbe wird die Linſe geſenkt, alſo das Pendel verlängert, durch die Ausdehnung der beiden Zinkſtäbe dagegen wird die Linſe gehoben, das Pendel alſo verkürzt. Die Länge der Metallſtäbe muß nun ſo gewählt werden, daß die durch die Eiſenſtäbe bewirkte Verlängerung gerade ſo groß iſt wie die durch die Zinkſtäbe bewirkte Verkürzung. Dies iſt der Fall, wenn ſich die Summe der Längen eines der äußeren und des mittleren Eiſenſtabes zur Länge eines der beiden Zinkſtäbe umgekehrt wie die Ausdehnungskoeffizienten von Eiſen und Zink verhält, d. h. umgekehrt wie die auf S. 29 für die genannten Metalle gegebenen Zahlen.

Beiſpiel 1. Eine Eiſenbahnſchiene iſt bei 20° C 6 m lang. Wie groß iſt der Unterſchied der Längen, die ſie bei + 40° C und bei — 30° C hat?

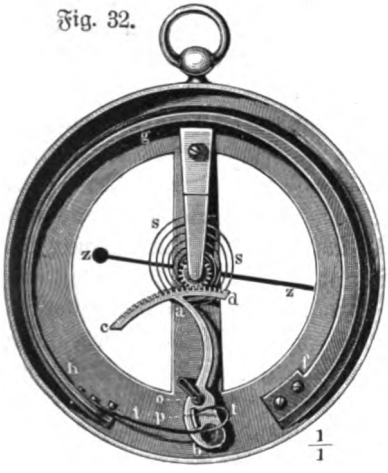
Beiſpiel 2. Eine Pendelſtange aus Platin trägt an ihrem unteren Ende eine in der angegebenen Weiſe befeſtigte kreisförmige Zinkſcheibe. Das Wievielfache muß die Länge der Stange vom Durchmeſſer der Scheibe ſein, wenn die Entfernung des Mittelpunktes der Scheibe vom Aufhängungspunkt unverändert bleiben ſoll, wenn ſich die Temperatur ändert?

§ 30. Auf der ungleichen Ausdehnung der Metalle beruht die Einrichtung des Metallthermometers, welches am

Digitized by Google

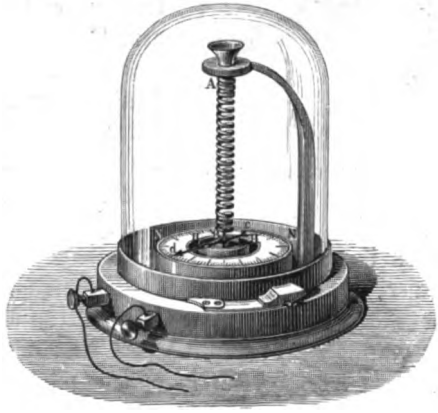
Anfang des 19. Jahrhunderts von Urban Jörgensen, einem Uhrmacher in Kopenhagen, erfunden wurde. Ein solches Thermometer (Fig. 32) besteht im wesentlichen aus einem sogenannten Kompensationsstreifen, d. h. aus einem aus zwei verschiedenen Metallen, z. B. Kupfer und Stahl (Kupfer auf der Innenseite), zusammengesetzten und kreisförmig gebogenen Streifen. Derselbe ist an dem einen Ende *f* befestigt und drückt mit dem anderen Ende gegen den kurzen Arm eines Hebels, der sich um die Achse *o* dreht. Bei steigender Temperatur streckt sich der Streifen etwas, weil sich das Kupfer stärker als

Fig. 32.



Metallthermometer.

Fig. 33.



Breguetsches Metallthermometer.

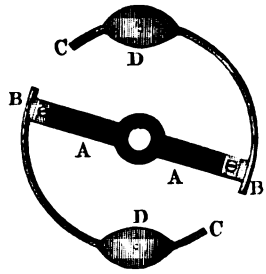
der Stahl ausdehnt, und der kurze Hebelarm wird nach links bewegt. Bei fallender Temperatur zieht sich der Streifen etwas zusammen und der Druck gegen den Hebelarm läßt nach. Die Bewegung des Hebels wird vermittelst des gezahnten Bogens *cd* und eines kleinen Zahnrades auf die Achse des letzteren und einen mit der Achse verbundenen Zeiger übertragen. Die Teilung, auf welcher der Zeiger ähnlich wie der Zeiger einer Uhr die Temperatur angibt, wird durch Vergleichung mit einem Quecksilberthermometer hergestellt.

Sehr empfindliche Metallthermometer wurden von dem französischen Mechaniker Breguet (1748 bis 1823) angefertigt. Die von ihm verwendeten Kompensationsstreifen bestehen aus drei verschiedenen Metallen, Silber, Gold und Platin. Ein durch Walzen der zusammengelöteten Metalle hergestelltes Band wird schraubenförmig aufgerollt, am oberen Ende befestigt und am unteren Ende mit einem leichten Zeiger versehen, der sich auf einem geteilten Kreise bewegt (Fig. 33), an dem die Temperatur abgelesen wird. Diese Thermometer sind sehr empfindlich, kommen aber leicht in Unordnung. Die in der Figur sichtbaren Schrauben dienen dazu, die Spirale in den Schließungsbogen eines schwachen elektrischen Stromes einzuschalten, der durch die von ihm entwickelte Wärme gemessen werden soll.

Digitized by Google

Um die Unruhe der Chronometer gegen den Einfluß der Temperatur unempfindlich zu machen, gibt man ihr die aus Fig. 34 ersichtliche Einrichtung. Der Umfang des Schwungrades ist an zwei gegenüberliegenden Stellen unterbrochen und die bogenförmigen Arme sind aus zwei verschiedenen Metallen zusammengesetzt, von denen sich das äußere stärker ausdehnt als das innere. Bei steigender Temperatur verlängert sich der Durchmesser *BB*. Die Verlängerung würde eine Verzögerung der Bewegung zur Folge haben. Diese Verzögerung wird aber dadurch aufgehoben, daß sich die Arme infolge der ungleichen Ausdehnung etwas stärker krümmen und die Massen *D* dem Mittelpunkt nähern.

Fig. 34.



Chronometerunruhe.

§ 31. Die Bestimmung der Ausdehnung der Flüssigkeiten ist nicht sehr einfach, weil die Flüssigkeiten keine selbständige Form besitzen. Wenn z. B. die Flüssigkeit in einem Thermometer erwärmt wird, so bekommt man nicht die Ausdehnung der Flüssigkeit allein zu sehen, weil sich auch die Röhre, in der die Flüssigkeit enthalten ist, ausdehnt. Die scheinbare Ausdehnung, welche man beobachtet, ist kleiner, als die wirkliche Ausdehnung. Man muß also die Ausdehnung der Röhre kennen und mit Berücksichtigung derselben die Ausdehnung der Flüssigkeit berechnen. Die Ausdehnung der Röhre kann aber nicht bestimmt werden, wenn man nicht mindestens die Ausdehnung einer Flüssigkeit kennt. Robert Hooke (I, § 166) zeigte, wie sich diese Schwierigkeit umgehen läßt. Er bediente sich des Umstandes, daß eine Flüssigkeit bei höherer Temperatur spezifisch leichter ist als bei niedriger Temperatur, und er bestimmte den Gewichtsverlust einer eisernen Kugel zuerst in eiskaltem Wasser und dann in siedendem Wasser. Hieraus läßt sich das Verhältnis der Volume gleicher Gewichtsmengen Wasser bei den beiden verschiedenen Temperaturen, also auch die Ausdehnung des Wassers ableiten. Allerdings muß bei diesem Verfahren die Ausdehnung des Eisens bekannt sein, was bei dem Verfahren von Dulong und Petit, welches sich auf das Gesetz der kommunizierenden Gefäße stützt, nicht erforderlich ist. In Fig. 35 ist der Apparat abgebildet, dessen sich die genannten Physiker bedienten, um die Ausdehnung des Quecksilbers zu bestimmen. Die Röhren *A* und *C* stehen durch die engere Röhre *B* in Verbindung. Die Röhre *A* ist von warmem Öl umgeben, dessen Temperatur durch das Luftthermometer *GS* ermittelt wird. Die Röhre *C* dagegen ist von Eiswasser umgeben. Beide Röhren enthalten Quecksilber. Dieses steht aber in *A* höher als in *C*, weil das warme Quecksilber leichter ist als das kalte. Die Höhen der Quecksilbersäulen in *A* und *C* werden genau gemessen. Aus diesen ergibt sich dann die Ausdehnung des Quecksilbers durch eine einfache Rechnung[1]). Das Quecksilber dehnt sich bei

[1]) Bezeichnet man die Höhen der Quecksilbersäulen in *A* und *C* mit *H* und H_1, die spezifischen Gewichte des warmen und des kalten Quecksilbers mit *d* und

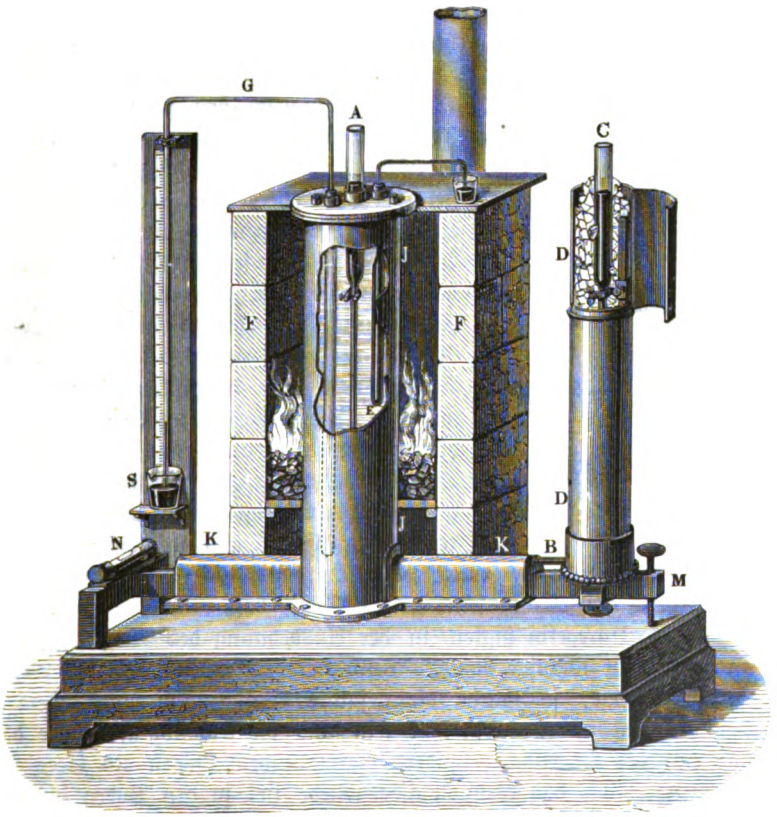
Digitized by Google

einer Erwärmung um 1° ungefähr um $^1/_{5550}$ ſeines Volums aus. Die Ausdehnung erfolgt bis zu 100° vollkommen gleichmäßig. Daher iſt das Queckſilber eine ſehr geeignete Thermometerflüſſigkeit.

§ 32. Beſonderes Intereſſe bietet die Ausdehnung des Waſſers, die eine Ausnahme von dem allgemeinen Ausdehnungsgeſetz bildet.

Bereits die Mitglieder der Accademia del Cimento hatten bemerkt, daß ſich das Waſſer, wenn es über den Eispunkt erwärmt wird, nicht ausdehnt,

Fig. 35.



Meſſung der Ausdehnung des Queckſilbers.

ſondern zuſammenzieht. Sie beobachteten die Erſcheinung an einer mit Waſſer gefüllten Thermometerröhre. Da ſie es aber für ſehr unwahrſcheinlich hielten, daß ſich das Waſſer wirklich beim Erwärmen zuſammenzieht, erklärten ſie die Erſcheinung durch die Annahme, daß ſich das Glas in der Nähe des

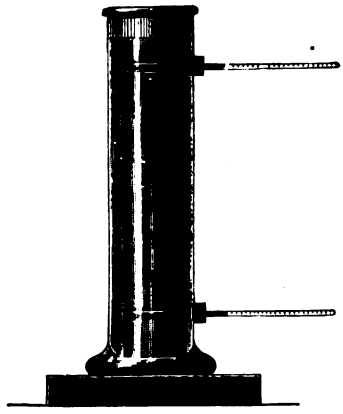
d_1, ſo hat man: $H : H_1 = d_1 : d$. Bezeichnet man ferner die Volume gleicher Gewichtsmengen warmen und kalten Queckſilbers mit v und v_1, ſo hat man: $v : v_1 = d_1 : d$. Hieraus folgt: $H : H_1 = v : v_1$.

Digitized by Google

Eispunktes stärker ausdehnt, als das Wasser, und diese Erklärung hielt sich über 100 Jahre lang. Erst 1776 machte Deluc darauf aufmerksam, daß das Wasser wirklich seine größte Dichte bei ungefähr 4° C hat.

Die Temperatur der größten Dichte des Wassers läßt sich durch folgenden Versuch ermitteln, der zuerst ungefähr zu derselben Zeit vom Grafen Rumford und von J. G. Tralles (1763 bis 1822), Professor der Physik in Berlin, ausgeführt worden ist. Man füllt ein zylindrisches Gefäß, in dessen Wand oben und unten ein Thermometer eingesetzt ist (Fig. 36), mit Wasser und läßt es bis auf 0° erkalten, indem man fortwährend die beiden Thermometer beobachtet. Während sich das Wasser abkühlt, zieht es sich zunächst zusammen. Das kälteste Wasser ist zugleich das schwerste und sinkt infolgedessen nach unten, während das wärmere und leichtere Wasser nach oben steigt. Das obere Thermometer zeigt also eine höhere Temperatur an als das untere. Wenn das Wasser seine größte Dichte erreicht hat, zeigen beide Thermometer dieselbe Temperatur an, und sobald diese Temperatur überschritten ist, wenn also das dichtere Wasser nicht mehr das kältere, sondern das wärmere ist, zeigt das untere Thermometer eine höhere Temperatur an als das obere. Diejenige Temperatur, welche von beiden Thermometern gleichzeitig angezeigt wird, also die Temperatur der größten Dichte des Wassers, ist 4° C.

Fig. 36.



Ausdehnung des Wassers.

Dieses abweichende Verhalten zeigen auch wässerige Salzlösungen, z. B. das Meerwasser. Dieses hat seine größte Dichte bei — 3,5°.

§ 33. Die Unregelmäßigkeit in der Ausdehnung des Wassers spielt in der Natur eine sehr wichtige Rolle. Wenn sich das Wasser bis zum Gefrierpunkt zusammenzöge, so würde die gesamte Wassermasse eines Sees im Winter schnell bis auf 0° abgekühlt sein und die Eisbildung würde daher nicht nur auf der Oberfläche, sondern auch auf dem Boden des Sees stattfinden können. Auch das Grundwasser würde tief in den Boden hinein zu Eis erstarren. Das Grundeis würde aber im Sommer nicht schmelzen, da das eiskalte Wasser nicht in die Höhe steigt, sondern mit dem Eis in Berührung bleibt. Nur die oberste Wasserschicht würde eine höhere Temperatur annehmen. Die Seen würden unter diesen Umständen gar nicht auftauen, die Erde würde in der Tiefe gefroren sein und die Erdoberfläche würde einen kalten und unfruchtbaren Sumpf bilden.

Diese Zustände treten aber nicht ein, weil das Wasser bei 4° am dichtesten ist. Das kalte Wasser bleibt an der Oberfläche, und selbst wenn sich eine dicke Schicht Eis bildet, wird sie durch die Sommerwärme schnell geschmolzen. Denn sobald das Eis mit einer Schicht Wasser bedeckt ist, steigt

Digitized by Google

in dieser fortwährend das Wasser von 0° nach oben, während wärmeres Wasser nach unten sinkt und das Schmelzen des Eises bewirkt.

§ 34. Als man erkannt hatte, daß der Eispunkt und der Siedepunkt des Wassers bestimmte Wärmegrade bezeichnen, wurde auch das Verhalten der Luft beim Erwärmen genauer untersucht.

So untersuchte Guillaume Amontons (1663 bis 1705), wie die Ausdehnungskraft (Spannung) der Luft wächst, wenn diese erwärmt wird. Er sperrte eine gewisse Menge Luft in einer Kugel durch Quecksilber ab (Fig. 37) und tauchte die Kugel in siedendes Wasser ein. Die Luft dehnt sich aus und infolgedessen steigt das Quecksilber in dem engen Rohr. Die Quecksilbersäule erzeugt einen bedeutenden Gegendruck und hindert die Luft sich auszudehnen. Wenn die Kugel groß und das Rohr eng ist, so nimmt das Volum der Luft nicht merklich zu. Die Erwärmung bewirkt dann nur, daß die Spannung der Luft größer wird.

Fig. 37.

Amontons' Luftthermometer.

Amontons benutzte diesen Apparat als Thermometer, indem die Quecksilbersäule in dem Rohr ein Maß für die Temperatur bildete, die die Luft in der Kugel besitzt. Natürlich muß dabei der Barometerstand berücksichtigt werden. Amontons fand, daß der Druck der Luft um ein Drittel größer wurde, wenn die Kugel aus Eiswasser herausgenommen und in siedendes Wasser eingetaucht wurde. Ferner fand er, daß der Druck der Luft mit der Temperatur gleichmäßig zunimmt. Genaue Messungen, die seitdem von verschiedenen Physikern ausgeführt worden sind, haben ergeben, daß der Druck der abgesperrten Luft für jeden Grad Celsius um $^1/_{273}$ des Druckes bei 0° zunimmt. Wenn also die Luft von 0° bis 273° erwärmt wird, so verdoppelt sich der Druck derselben.

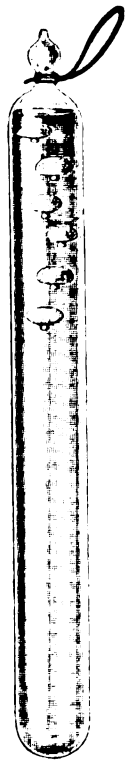
§ 35. Um wieviel sich die Luft ausdehnt, wenn sie erwärmt, aber der Druck unverändert gehalten wird, ergibt sich in folgender Weise. Nach dem Boyleschen Gesetz (I, § 259) ist das Volum einer Luftmenge dem Druck umgekehrt proportional. Da nun abgesperrte Luft, die sich nicht ausdehnen kann, beim Erwärmen von 0° bis 273° den doppelten Druck erreicht, so muß sie sich auf das doppelte Volum ausdehnen, wenn der Druck auf den ursprünglichen Wert erniedrigt wird. Folglich wird sich die Luft, die auf 273° C erwärmt wird, wenn sich der Druck nicht ändert, auf das doppelte Volum ausdehnen. Da die Ausdehnung gleichmäßig vor sich geht, so dehnt sich die Luft für jeden Grad, um den sie erwärmt wird, um $^1/_{273}$ ihres Volums bei 0° aus. Während sich die festen und die flüssigen Körper bei gleicher Erwärmung in sehr verschiedenem Grade ausdehnen, dehnen sich die Luftarten bei gleicher Erwärmung alle gleich stark aus oder sie besitzen sämtlich denselben Ausdehnungskoeffizienten ($^1/_{273}$).

§ 36. In den „Saggi" ist eine Art Thermoskop, d. h. ein Apparat, der

Digitized by Google

die Änderung der Temperatur anzeigt, abgebildet (Fig. 38), den der Großherzog Ferdinand II. dem deutschen Jesuitenpater Athanasius Kircher sandte. Das Instrument bestand aus einem Glasrohr, welches fast ganz mit Wasser gefüllt war. In dem Wasser befanden sich einige kleine birnförmige Glasbehälter, die einen kurzen, abwärts gewendeten Hals hatten. Diese kleinen Glasbehälter waren nicht ganz mit Wasser angefüllt, sondern enthielten eine Luftblase, deren Größe so bemessen war, daß die Glasbehälter bei einer bestimmten Temperatur — etwa 15° — im Wasser schwebten. Bei höherer Temperatur dehnte sich die Luft aus und drückte etwas Wasser aus dem Behälter aus. Dieser wurde infolgedessen leichter und stieg an die Oberfläche des Wassers empor. Wenn dagegen die Temperatur unter 15° herabging, so zog sich die Luft zusammen und die Glasbehälter sanken auf den Boden des Rohres. — Zugleich mit diesem Apparat erhielt Kircher einen zweiten, der mit dem ersten große Ähnlichkeit hatte, sich aber von diesem dadurch unterschied, daß er vollständig mit Wasser gefüllt und zugeschmolzen war. In diesem Apparat zeigten die Glasbehälter das entgegengesetzte Verhalten, d. h. sie sanken, wenn das Wasser wärmer wurde, und stiegen, wenn es kälter wurde.

Fig. 38.



Florentiner Thermoskop.

Der Großherzog überließ die Erklärung dieses Verhaltens Kircher selbst. Der Apparat bildete also eine Art Rätsel, welches Kircher lösen sollte, was diesem auch gelang. Der Leser möge versuchen, ob es ihm auch gelingt, das Rätsel zu lösen.

§ 37. Fig. 39 stellt eine Abbildung aus dem 17. Jahrhundert vor, aus welcher hervorgeht, wie man einen durch Wärme erzeugten Luftstrom nutzbar zu machen versucht hat. Unter einem langen aufsteigenden Rohr brennt Feuer. Die warme und leichte Luft steigt durch das Rohr in die Höhe und setzt das Rad *K* in Bewegung. Die große Geschwindigkeit dieses Rades wird durch Zahnräder in eine langsame Bewegung umgesetzt, die mit großer Kraft ein Walzwerk treibt.

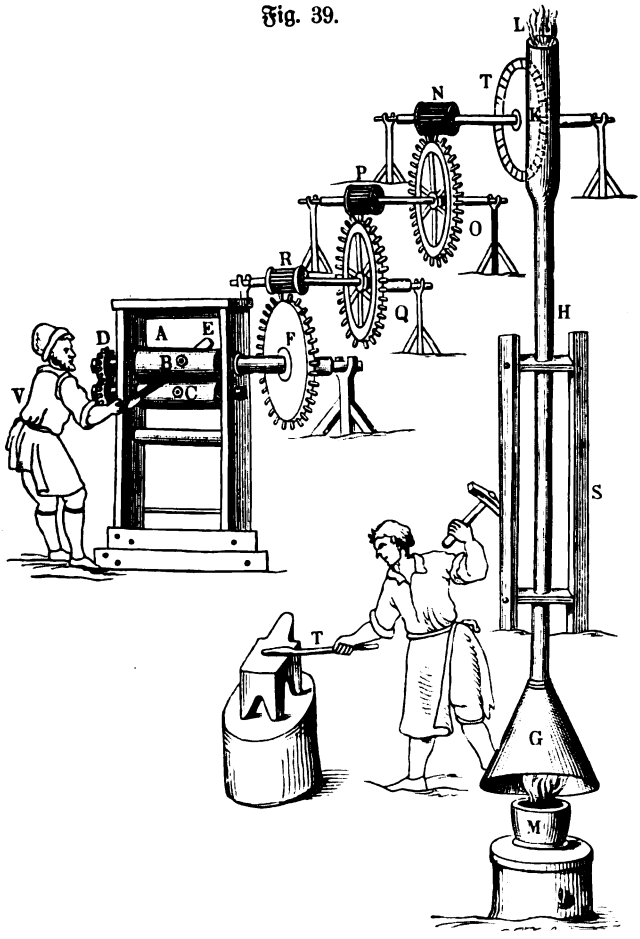
Auf der durch Wärme erzeugten Strömung beruht auch der Zug in Schornsteinen sowie die Erwärmung und Ventilation von Zimmern. Je höher der Schornstein ist, desto stärker ist der Zug in ihm, desto länger ist nämlich die warme und leichte Luftsäule, die durch das Übergewicht einer ebenso langen aber schweren Luftsäule in die Höhe getrieben wird.

Die Luft in Zimmern wird dadurch erwärmt, daß kalte Luft nach dem Ofen hinströmt und warme Luft von demselben hinwegströmt. Die Ventilation, welche bezweckt, das Zimmer mit frischer Luft zu versehen, besteht darin, daß die warme Luft, welche zum Atmen gedient hat, durch Ventile in

Digitized by Google

der Nähe der Decke abgeleitet wird, während frische Luft durch Ventile in der Nähe des Fußbodens einströmt. Wenn die Ventilation kräftig wirken soll, so muß das Ventil, durch welches die warme und verbrauchte Luft abgeführt wird, mit einem Schornstein in Verbindung gesetzt werden.

Fig. 39.



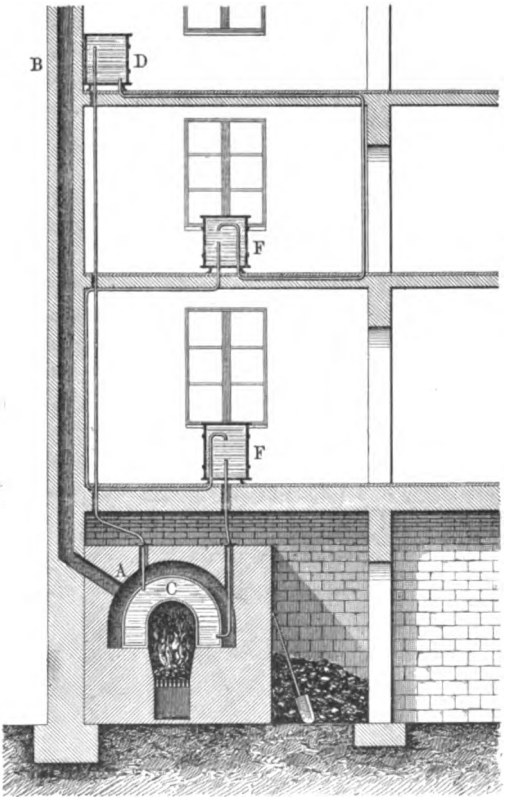
Luftstrom durch Wärme erzeugt (Bild aus dem Jahre 1629).

In ganz ähnlicher Weise entsteht eine Strömung im Wasser, wenn verschiedene Teile desselben ungleich erwärmt werden. Hierauf beruht die sogenannte Warmwasserheizung. In Fig. 40 (a. f. S.) ist *C* ein eiserner Kessel, in welchem das Wasser erwärmt wird. Vom Boden des Kessels geht ein Rohr nach einem geschlossenen Behälter *F* in der ersten Etage, von diesem ein Rohr nach dem ebenfalls geschlossenen Behälter *F* in der zweiten Etage, und von diesem wieder ein Rohr nach *D* in der obersten Etage. Von dem obersten

Digitized by Google

Behälter geht ein Rohr zurück nach dem Kessel, und zwar tritt es in diesen von oben her ein. Die Röhren und die Behälter sind ebenso wie der Kessel mit Wasser gefüllt, doch ist in *D* Platz für die Ausdehnung, welche das Wasser durch die Erwärmung erfährt. Wenn nun das Wasser im Kessel erwärmt wird, so strömt das warme Wasser in die oberste Etage empor und sinkt von hier (durch *F,F*) wieder in den Kessel zurück, wird hier von neuem erwärmt u. s. w. Die Luftströmungen in der Atmosphäre sowie die Wasserströmungen im Meere werden später (in dem Abschnitt über Meteorologie) besprochen werden.

Fig. 40.



Warmwasserheizung.

§ 38. Die Völker des Altertums waren, wie bereits erwähnt, mit dem Ausschmelzen der Metalle und mit der Glasbereitung bekannt. Sie wußten also, daß feste Körper in der Wärme schmelzen, d. h. flüssig werden, ebenso, daß die flüssigen (geschmolzenen) Metalle beim Erkalten erstarren, und sie verstanden es, hiervon bei den genannten Arbeiten Gebrauch zu machen. Die Schmelzkunst spielte in ihrer ganzen Kultur eine große Rolle.

Es ist kaum zu bezweifeln, daß die Alten glaubten, das Schmelzen komme dadurch zustande, daß das Feuer (die Wärme) in den festen Körper eindringe. Heron sagt (I, § 209), der Diamant könne nicht glühen, weil die Feuerteilchen zu groß seien, um in die Poren desselben eindringen zu können. Die Poren der Metalle dagegen sind größer, so daß das Feuer eindringen und die Metalle glühend machen kann. Und wenn die Hitze einen hinreichend hohen Grad erreicht hat, so schmelzen die Metalle.

§ 39. Galilei kam durch das Studium des Aristoteles und Heron zu derselben Auffassung des Schmelzprozesses. Aristoteles lehrt, daß der Grund der Kohäsionskraft der Körper der Abscheu der Natur vor dem leeren

Digitized by Google

Raum (horror vacui) ist. Wenn nämlich ein Körper gespalten wird, so muß im ersten Augenblick ein leerer Raum entstehen, und dies sucht die Natur zu verhindern. — Diesen Gedanken nimmt Galilei auf und bildet ihn weiter aus. Er weiß, daß die Kohäsionskraft für verschiedene Körper ungleich groß ist, und da er annehmen muß, daß der horror vacui auf alle Körper gleich stark wirkt, schließt er, daß die ungleiche Kohäsion von der Verschiedenheit der Poren der Körper herrührt. Wenn die Poren groß sind, und also bei der Spaltung ein größerer leerer Raum entsteht, dann ist auch die Kohäsionskraft groß. Wenn die Poren dagegen klein sind, so hat auch der horror vacui wenig Gelegenheit, sich geltend zu machen und die Kohäsionskraft ist kleiner. In demjenigen Körper, der die größten Poren hat, hängen die einzelnen Teile mit der größten Kraft zusammen.

Galilei erklärt bei dieser Gelegenheit auch, worin der Unterschied zwischen den festen und den flüssigen Körpern besteht. In den Flüssigkeiten sind die Poren ausgefüllt. Infolgedessen hält der horror vacui die Teile nicht zusammen und es existiert also keine Kohäsion.

Wenn ein fester Körper in der Wärme schmilzt, so dringen die Wärmeteilchen in die Poren ein und füllen sie aus. Der Körper wird flüssig. Wenn der geschmolzene Körper erkaltet, so strömt die Wärme wieder aus den Poren aus, der horror vacui tritt wieder in Wirksamkeit und der Körper wird fest.

Galilei betrachtet also die Wärme als einen Stoff, der in die Körper eintreten und aus denselben austreten kann, und, auf Herons Lehre von den Poren gestützt (I, § 209), erhält er eine anschauliche Theorie der Erscheinungen des Schmelzens und Erstarrens.

§ 40. Eine genauere Untersuchung des Schmelzprozesses wurde ungefähr gleichzeitig von der Accademia del Cimento und Robert Boyle vorgenommen. Die Untersuchungen betrafen das Schmelzen des Eises und das Gefrieren des Wassers.

Wie bereits erwähnt (§ 21), beobachtete die Accademia del Cimento, daß Eiswasser immer denselben Wärmegrad hat. Wir nennen ihn den Schmelzpunkt des Eises oder den Gefrierpunkt des Wassers. Aber es war nicht die Unveränderlichkeit des Schmelzpunktes, was die Accademia del Cimento und Robert Boyle interessierte, sondern die Ausdehnung, welche beim Gefrieren des Wassers stattfindet.

Galilei hatte darauf aufmerksam gemacht, daß Eis leichter als Wasser ist, da es auf diesem schwimmt. Hieraus folgt, daß ein Pfund Wasser einen kleineren Raum einnimmt als ein Pfund Eis. Die Accademia del Cimento suchte zu ermitteln, um wieviel sich das Wasser beim Gefrieren ausdehnt.

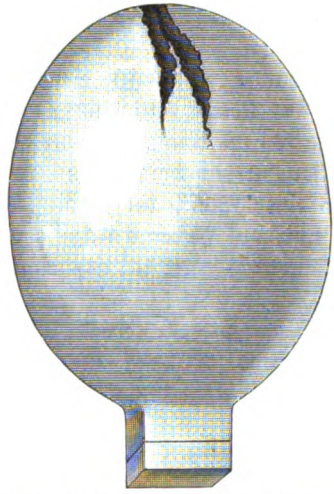
Eine an dem einen Ende geschlossene Röhre wurde mit eiskaltem Wasser gefüllt und dieses wurde zum Gefrieren gebracht. Dabei trat aus dem offenen Ende der Röhre ein Eiszapfen hervor. Durch Wägen dieses Eiszapfens und Vergleichen seines Gewichtes mit dem Gewicht der ursprünglich in der Röhre enthaltenen Wassermenge fanden die Mitglieder der Akademie, daß nur $^8/_9$ des Wassers als Eis in der Röhre enthalten sein konnte. Acht Pfund

Digitized by Google

Eis nehmen alſo denſelben Raum ein wie neun Pfund Waſſer, d. h. das ſpezifiſche Gewicht des Eiſes iſt $^8/_9$. Spätere genauere Meſſungen haben ergeben, daß das ſpezifiſche Gewicht des Eiſes etwas größer, nämlich ungefähr $^9/_{10}$ iſt. Ein Eisberg, der auf dem Waſſer ſchwimmt, hat daher nur $^1/_{10}$ ſeines Gewichtes über dem Waſſer, die übrigen $^9/_{10}$ unter dem Waſſer. Ein zylindriſcher Eisberg, der 50 m aus dem Waſſer hervorragt, reicht alſo 450 m unter die Oberfläche des Waſſers. In der Regel iſt der Fuß des Berges breiter als der obere Teil desſelben, und man nimmt an, daß ein Eisberg ungefähr fünfmal ſo weit unter den Waſſerſpiegel reicht als er über denſelben hervorragt.

§ 41. Die Ausdehnung beim Gefrieren vollzieht ſich mit außerordentlich großer Kraft. Die Accademia del Cimento zeigte dies dadurch, daß ſie einen ſtarken Metallbehälter, eine Art Granate (Fig. 41 u. 42) mit Waſſer von 0° füllte und dieſes gefrieren ließ. Der Behälter wurde durch das Eis geſprengt, ſo ſtark er auch ſein mochte.

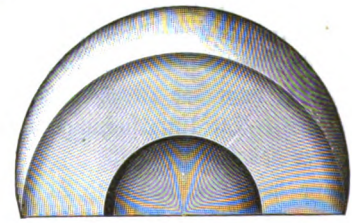
Fig. 41.



Gefrierverſuch der Accademia del Cimento.

Die Natur bietet dieſelbe Erſcheinung im großen. Im Herbſt füllen ſich die Felsſpalten mit Waſſer, und wenn

Fig. 42.



Durchſchnitt von Fig. 41.

dieſes im Winter gefriert, ſo dehnt es ſich mit ſolcher Kraft aus, daß die Geſteine geſpalten werden. Derſelbe Vorgang findet in feuchtem Mauerwerk ſtatt. Das Waſſer in den Poren des Mauerwerks gefriert und ſprengt den Stein. Für den Ackerbau ſpielt die Ausdehnung des Waſſers beim Gefrieren eine große Rolle. Beim Herannahen des Winters iſt der gepflügte Ackerboden von unzähligen feinen Kanälen durchzogen, die mit Waſſer gefüllt ſind. Wenn dann Froſtwetter eintritt, ſo gefriert das Waſſer in dieſen Kanälen, dehnt ſich dabei aus und lockert die Ackererde auf. Dieſe befindet ſich daher im Frühjahr in einem zur Aufnahme des Saatkorns geeigneten Zuſtande.

§ 42. Robert Boyle ſtellte ungefähr dieſelben Verſuche an wie die Accademia del Cimento, aber er unterſuchte zugleich, ob alle Flüſſigkeiten ebenſo wie das Waſſer in der Kälte erſtarren. Er fand, daß gewiſſe Flüſſig-

Digitized by Google

keiten, z. B. Spiritus und Säuren, in der stärksten Kälte, die er mit seinen Kältemischungen erzeugen konnte, nicht erstarrten.

Die Kunst der Kälteerzeugung kannte bereits Della Porta im Jahre 1589. Er mischte Schnee und Salpeter, die aufeinander einwirkten, so daß das Gemisch flüssig und zugleich viel kälter wurde als Eiswasser. Die Accademia del Cimento benutzte zu Gefrierversuchen verschiedene Kältemischungen, z. B. Schnee und Kochsalz, Schnee und Spiritus. Am kräftigsten wirkte Schnee und Salmiak. Diese Mischung gab eine Temperatur von 5° des Florentiner hundertteiligen Thermometers, welches in stärkster Winterkälte 17° und in den Sonnenstrahlen der stärksten Sommerhitze 80° zeigte.

Boyle kannte ebenfalls diese Kältemischungen. Er zeigte, daß die Entstehung der Kälte beim Mischen von Salz und Schnee ihren Grund darin hat, daß die beiden Substanzen flüssig werden. Zum Schmelzen des Schnees ist Wärme erforderlich (die Poren des Schnees müssen gefüllt werden), ebenso zum Flüssigwerden des Salzes, und diese Wärme wird vom Schnee und vom Salz selbst genommen. Daß das Gemisch trotz der Abkühlung nicht wieder erstarrt, hat seinen Grund darin, daß die starke Salzlösung, welche entsteht, einen niedrigen Schmelzpunkt besitzt.

Wenn die Kältemischung kräftig wirken soll, so muß der Schnee und das Salz in einem bestimmten Verhältnis gemischt werden. Mischt man 100 Tle. Schnee mit 30 Tln. Chlorkalium oder mit 25 Tln. Salmiak oder mit 33 Tln. Kochsalz, so erhält man eine Temperatur von — 10,9°, bezw. — 15,4° und — 21,3° C. Eine noch stärkere Abkühlung (— 35° C) erhält man durch Übergießen von Schnee mit Salzsäure.

§ 43. Je mehr das Thermometer im Laufe der Zeit vervollkommnet wurde, desto genauer wurde die Schmelztemperatur der verschiedenen Körper ermittelt. Es zeigte sich, daß fast alle Substanzen ebenso wie das Eis bei einer ganz bestimmten Temperatur flüssig werden, daß sie einen festen Schmelzpunkt haben.

In der folgenden Tabelle sind die Schmelzpunkte einiger Körper zusammengestellt.

Quecksilber	— 39° C	Zink	+ 420° C
Eis	0	Aluminium	700
Talg	+ 40	Silber	1000
Stearin	46	Kupfer	1100
Wachs	68	Gold	1200
Schwefel	115	Gußeisen	1200
Zinn	230	Schmiedeeisen	1600
Blei	330	Platin (über)	1600

Einige von diesen Körpern, z. B. Wachs und Schmiedeeisen, ebenso Glas, gehen allmählich aus dem festen in den flüssigen Zustand über und kommen dabei in einen zähflüssigen Übergangszustand.

Digitized by Google

Glas und Schmiedeeisen können in diesem Zustande geformt, und zwei Stücke Schmiedeeisen können zusammengeschweißt werden.

Bei einigen Körpern, wie Gußeisen, Zinn u. a. m., existiert ein solcher Übergangszustand nicht. Sie gehen unmittelbar aus dem festen in den flüssigen Zustand über. Wenn solche Körper in bestimmte Formen gebracht werden sollen, so geschieht dies durch Gießen. Zur Herstellung von eisernen Gußwaren dienen Formen aus einem Gemisch von Sand und Lehm (Formsand).

§ 44. Einerlei, ob ein fester Körper zunächst zähflüssig oder sofort dünnflüssig wird, jedenfalls erleidet er eine Veränderung, sobald der Schmelzpunkt erreicht ist. Das Gleichgewicht ist vorbei, die Teilchen ordnen sich in anderer Weise an. Eine Flüssigkeit zeigt unter gewöhnlichen Umständen ein entsprechendes Verhalten, d. h. sie erstarrt beim Erkalten entweder plötzlich oder sie wird vorher zähflüssig. Fahrenheit machte jedoch zufällig die Beobachtung, daß das Wasser unter gewissen Bedingungen weit unter 0° abgekühlt werden kann, ohne zu gefrieren. Er füllte eine Glaskugel, an die ein kurzes Glasrohr angeschmolzen war, zur Hälfte mit Wasser, brachte dann dieses zum Sieden und schmolz das Ende des Glasrohres zu. Diese Kugel setzte er dann nachts einer Temperatur von 15° F (ungefähr — 9,5° C) aus und fand morgens, daß das Wasser trotz der niedrigen Temperatur flüssig geblieben war. Erst als er die Spitze abbrach, erstarrte das Wasser zum Teil, und er glaubte daher, das Wasser habe dem Frost deshalb widerstanden, weil die Kugel keine Luft, sondern nur Wasserdampf enthielt. Er überzeugte sich jedoch alsbald, daß das Wasser auch in Berührung mit Luft unterkühlt werden kann, wenn es nur vollkommen in Ruhe ist. Die geringste Bewegung bewirkt in der Regel, daß das Wasser erstarrt. — Später hat man gefunden, daß das Wasser sogar bis auf — 20° C abgekühlt werden kann, ohne zu gefrieren. Auch andere Flüssigkeiten, z. B. geschmolzener Schwefel, können unter den Schmelzpunkt abgekühlt werden, ohne zu erstarren.

§ 45. Wenn im Vorhergehenden gesagt wurde, daß der Schmelzpunkt eines Körpers immer derselbe ist, so ist dabei stillschweigend vorausgesetzt worden, daß das Schmelzen unter dem gewöhnlichen Luftdruck stattfindet. Findet es dagegen unter erhöhtem Druck statt, so erleidet der Schmelzpunkt eine bedeutende Verschiebung. James Thomson machte 1849 auf diese Tatsache aufmerksam, und sein Bruder, der berühmte Physiker William Thomson (Lord Kelvin), wies durch Versuche nach, daß der Schmelzpunkt des Eises bei erhöhtem Druck niedriger wird. Er fand, daß Wasser unter einem Druck von 8 Atmosphären bei $^1/_{20}$° C unter Null, und unter einem Druck von 17 Atmosphären bei $^1/_2$° C unter Null erstarrt.

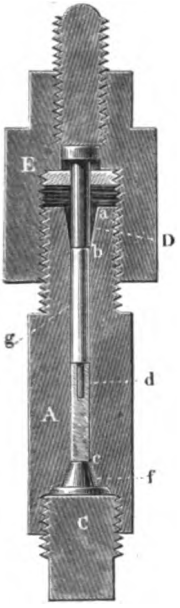
Mit weit höheren Drucken experimentierte 1858 Mousson in Genf. Er ließ Wasser in einem starken Stahlrohr gefrieren und übte dann durch Einschrauben eines Stempels (Fig. 43) einen großen Druck (von ungefähr 13000 Atmosphären) auf das Eis aus. Zwischen das Eis und den Stempel hatte er eine Metallscheibe gelegt, und es zeigte sich nach Beendigung des

Digitized by Google

Versuches, daß die Scheibe auf den Boden des Rohres herabgefallen war. Das Eis war also bei dem großen Druck geschmolzen, trotzdem das Rohr in einer Kältemischung von — 20° C stand.

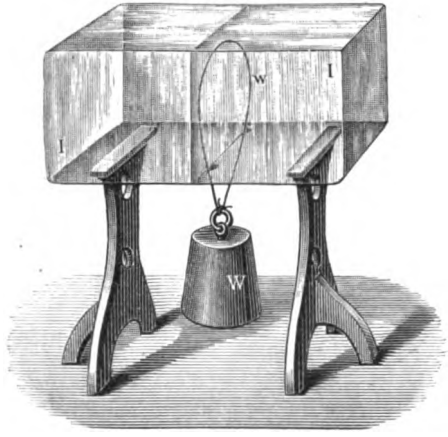
Derselbe Versuch kann mit einem Eisklumpen ausgeführt werden, indem man um denselben einen Metalldraht legt und diesen mit einem Gewicht belastet (Fig. 44). Wenn der Druck unter dem Draht groß genug ist, so

Fig. 43.



Schmelzen des Eises durch Druck.

Fig. 44.



Abhängigkeit des Schmelzpunktes vom Druck.

schmilzt das Eis und der Draht dringt durch das Eis hindurch. Dieses wird trotzdem nicht zerschnitten, weil das gebildete Wasser sofort wieder gefriert, wenn es über den Draht kommt.

§ 46. Durch die Abhängigkeit des Schmelzpunktes des Eises vom Druck findet eine großartige Naturerscheinung ihre Erklärung, nämlich die Bildung der Gletscher, die als Eisströme aus der Region des ewigen Schnees durch die Felsentäler in die Ebene hinabfließen (Fig. 45 a. f. S.). Je mehr sich der Schnee auf den Bergen auftürmt, desto größer wird der Druck, den die unteren Schichten erleiden. Schließlich schmelzen diese unter dem Einflusse des Druckes, erstarren aber sofort wieder, wenn der Druck nachläßt. Der Druck von oben macht sich jedoch ununterbrochen geltend und die Eiszunge schreitet immer weiter fort, wobei sie sich wie ein Wasserstrom durch die Felsenklüfte hindurchwindet. Das Eis zeigt unter dem großen Druck das Verhalten einer Flüssigkeit. Der Eisstrom zieht sich an engen Stellen seines Weges zusammen und breitet sich an weiteren Stellen wieder aus. Eine weitere Ähnlichkeit mit einem Wasserlauf zeigt der Eisstrom dadurch, daß er sich in der Mitte schneller bewegt als am Rande. Auch ein Wasserstrom hat in der Mitte eine größere Geschwindigkeit als am Ufer und am Boden, wo die Geschwindigkeit durch die Reibung am Erdboden vermindert wird.

Digitized by Google

Der englische Physiker Tyndall (1820 bis 1893) hat die „Plastizität“ des Eises zu einem interessanten Versuch benutzt. Zwei viereckige Holzklötzchen (Fig. 46) sind mit je einer halbkugelförmigen Vertiefung versehen. Wenn

Die Mer de glace am Montblanc. Fig. 45.

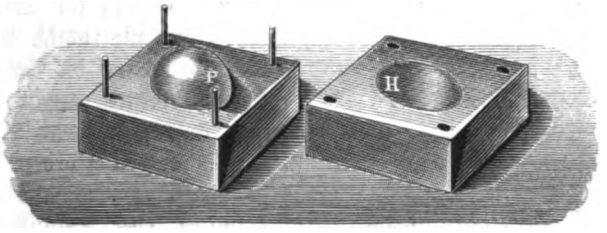
man diese mit Eisstücken füllt und dann die beiden Klötzchen vermittelst der hydraulischen Presse zusammendrückt, so vereinigen sich die Eisstückchen zu einer klaren Eiskugel.

Daß der Schmelzpunkt bei steigendem Druck sinkt, gilt übrigens keineswegs für alle Körper. Bei vielen Körpern findet das gerade Gegenteil statt.

Digitized by Google

Ob der Schmelzpunkt bei steigendem Druck sinkt oder steigt, hängt davon ab, ob sich der Körper beim Schmelzen ausdehnt oder zusammenzieht. Bei Körpern, die sich beim Schmelzen ausdehnen (Wachs, Stearin, Schwefel), steigt

Fig. 46.



Zusammendrücken von Eisstücken.

der Schmelzpunkt, bei Körpern, die sich beim Schmelzen zusammenziehen (Eis), sinkt der Schmelzpunkt, wenn der Druck gesteigert wird.

§ 47. Im Winter von 1754 auf 1755 war der bereits erwähnte französische Physiker Deluc mit Untersuchungen über das Schmelzen des Eises beschäftigt. Er erwärmte einen Eisklumpen, in dem ein Thermometer eingefroren war, in einer Schale über einer Flamme. Die Temperatur des Eisklumpens, welcher bedeutend unter 0° abgekühlt war, stieg bis Null. Bei dieser Temperatur fing er an zu schmelzen, aber nun stieg das Thermometer nicht mehr, solange das Eis nicht vollständig geschmolzen war. Dem Eis wurde also Wärme zugeführt, ohne daß die Temperatur desselben stieg.

Deluc veröffentlichte seine Beobachtung erst im Jahre 1772, und während dieser Zeit war ihm Joseph Black (1757) mit viel eingehenderen Untersuchungen über diesen Gegenstand zuvorgekommen.

Joseph Black war 1728 in Bordeaux geboren, wo sein Vater Kaufmann war. Die Eltern waren von Geburt Schotten. Sie sandten daher den Sohn, als dieser die Schule besuchen sollte, nach England. Er bezog 1746 die Universität in Glasgow, wo er Medizin und mit besonderem Interesse Chemie studierte. Sein Lehrer der Chemie war der berühmte Arzt Dr. Cullen. Im Jahre 1750 ging er nach Edinburg. Hier erhielt er den Doktortitel und zwar auf Grund einer Abhandlung, durch die sein Name in weiten Kreisen bekannt wurde. Bereits im Jahre 1756 wurde er als Nachfolger Cullens Professor der Chemie an der Universität in Glasgow und später in Edinburg. Black war, wie aus seinem Bilde deutlich zu ersehen ist, von schwachem Körperbau. Er starb im Alter von 71 Jahren.

Zu seinen bemerkenswertesten Arbeiten gehören seine Untersuchungen über das Schmelzen des Eises. Er macht zunächst ebenso wie Deluc darauf aufmerksam, daß sich die Temperatur des Eises während des Schmelzens nicht ändert. Dann erwähnt er die verbreitete Annahme, daß zum Schmelzen eines Körpers, z. B. des Eises, nur eine geringe Wärmemenge erforderlich sei,

Digitized by Google

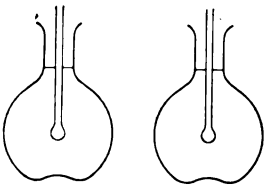
sobald der Schmelzpunkt erreicht sei. Black selbst ist anderer Ansicht, die er mit folgenden Worten klar und deutlich ausspricht: „Wenn wir beobachten, wie Eis oder Schnee in einem warmen Zimmer oder bei Tauwetter im Freien schmilzt, so bemerken wir leicht, daß sich das Eis, so kalt es auch sein mag, schnell bis auf den Schmelzpunkt erwärmt und dann auf der Oberfläche anfängt zu schmelzen. Wäre die allgemeine Annahme richtig, daß das Eis, welches bis auf die Temperatur des Schmelzpunktes erwärmt ist, nur eine äußerst geringe Wärmemenge zum Schmelzen erfordert, dann müßte ja die ganze Eismasse in wenigen Minuten oder Sekunden schmelzen, da von der Luft fortwährend Wärme an das Eis abgegeben wird. Wenn es wirklich so wäre, dann würden die Folgen davon oft fürchterlich sein, da schon unter den Verhältnissen, wie sie tatsächlich sind, gewaltige Überschwemmungen und starke Wasserläufe entstehen, wenn große Mengen von Eis oder Schnee schmelzen."

Fig. 47.

Joseph Black.

§ 48. Daß das Schmelzen Zeit erfordert, hat nach Black seinen Grund darin, daß beim Schmelzen Wärme verbraucht wird. Die Menge der verbrauchten Wärme sucht er in folgender Weise zu ermitteln. Zwei Fläschchen von gleicher Größe, von denen das eine mit Eis von 0°, das andere mit einer gleich großen Gewichtsmenge Wasser von 0° gefüllt ist, werden in ein warmes Zimmer gestellt. Black nimmt nun an, daß die Wärme von der Luft auf jede der beiden Flaschen in gleichen Mengen übergeht. Es zeigte sich, daß sich das Wasser in der einen Flasche in einer Viertelstunde auf 4° erwärmte, während es 20 Viertelstunden dauerte, bis das Eis in der anderen Flasche geschmolzen war. Mit anderen Worten, die Wärmemenge, welche zum Schmelzen von 1 Pfund Eis erforderlich ist, ist 20 mal größer als die Wärmemenge, die zum Erwärmen von 1 Pfund Wasser von 0° auf 4° erforderlich ist. Da aber zur Erwärmung von 1 Pfund Wasser um 4° offenbar viermal soviel Wärme erforderlich ist als zur Erwärmung derselben Menge Wasser um 1°, so ist die Schmelzwärme für 1 Pfund Eis $20.4 = 80$ Wärmeeinheiten, wenn man unter

Fig. 48.



Blacks Bestimmung der Schmelzwärme.

Digitized by Google

einer Wärmeeinheit (Kalorie) diejenige Wärmemenge versteht, welche erforderlich ist, um 1 Pfund Wasser um 1° C zu erwärmen.

„Diese Wärme (die Schmelzwärme)", sagt Black, „bewirkt nur, daß das Wasser in Eis verwandelt wird, und dieses Wasser ist nicht wärmer, als vorher das Eis war. Es wird also in das schmelzende Eis eine gewisse Menge Wärme übergeführt, die dazu verwendet wird, das Eis in den flüssigen Zustand zu bringen, ohne seine Temperatur zu erhöhen. Die Wärme wird also sozusagen vom Wasser absorbiert oder in demselben verborgen, so daß sie auf das Thermometer keine Wirkung ausübt."

Black bestimmte die Schmelzwärme des Eises auch noch in einer anderen Weise, die durch das folgende Beispiel erläutert wird. Vermischt man 80 g Wasser von 22° mit 5 g Schnee von 0°, so schmilzt der Schnee und die Temperatur des Wassers sinkt auf 16°. Die 80 g Wasser haben sich um 6° abgekühlt, folglich haben sie 80 . 6 = 480 Grammkalorien[1]) abgegeben. Diese Wärmemenge hat bewirkt, daß 5 g Schnee geschmolzen und die entstandenen 5 g Wasser um 16° erwärmt worden sind. Um 5 g Wasser von 0° bis 16° zu erwärmen, sind aber 5 . 16 = 80 Grammkalorien erforderlich. Wenn diese von den 480 Kalorien abgezogen werden, so bleiben 400 Kalorien übrig. Diese sind zum Schmelzen der 5 g Schnee verbraucht worden. Jedes Gramm Schnee verbraucht also zum Schmelzen 80 Wärmeeinheiten.

Fig. 49.

Gefrierthermometer.

§ 49. Ähnliche Betrachtungen wie die, welche Black über das Schmelzen anstellte, können auch hinsichtlich des Gefrierens geltend gemacht werden. Wenn eine Wassermasse auf 0° abgekühlt wird, so erstarrt sie nicht plötzlich, sondern sie muß Zeit haben, um dieselbe Wärmemenge abzugeben, welche zum Schmelzen der gleichen Gewichtsmenge Eis erforderlich sein würde. Ein Thermometer, welches in gefrierendem Wasser steht, zeigt so lange 0°, bis das Wasser vollständig erstarrt ist, trotzdem aus dem gefrierenden Wasser fortwährend Wärme austritt. Daß für jede Gewichtseinheit Wasser, die gefriert, 80 Wärmeeinheiten zum Vorschein kommen, zeigte Black durch den folgenden Unterkühlungsversuch mit dem sogenannten Gefrierthermometer.

Um das Gefäß eines gewöhnlichen Thermometers ist eine Glasbirne geblasen (Fig. 49), die mit Wasser gefüllt wird. Die Luft über dem Wasser wird durch Kochen ausgetrieben, bevor die Glasbirne zugeschmolzen wird. Wir wollen annehmen, die Birne enthalte 8 g Wasser. Diese Wassermenge wird auf — 10° C abgekühlt. Dann wird das Wasser durch Schütteln zum Gefrieren gebracht. Dabei steigt das Thermometer auf

[1]) Eine Grammkalorie ist diejenige Wärmemenge, welche erforderlich ist, um 1 g Wasser um 1° C zu erwärmen.

Digitized by Google

0° (vgl. § 44). Bei genauer Untersuchung zeigt es sich, daß 1 g Wasser zu Eis erstarrt ist. Dies steht in Einklang mit Blacks Annahme, denn die 8 g Wasser sind von −10° auf 0° erwärmt worden, und hierzu sind 8 . 10 = 80 Wärmeeinheiten erforderlich. Anderseits ist 1 g Wasser zu Eis erstarrt, und dabei sind 80 Wärmeeinheiten abgegeben worden.

§ 50. Durch Blacks Versuch ist also nachgewiesen, daß für jede Gewichtseinheit Eis, welche schmilzt, 80 Wärmeeinheiten im Wasser verborgen (latent) oder gebunden werden, ebenso daß beim Schmelzen einer jeden Gewichtseinheit Eis eine ebenso große Wärmemenge zum Vorschein kommt oder frei wird.

Etwas entsprechendes findet beim Schmelzen und Erstarren jedes beliebigen anderen Körpers statt. Beim Schmelzen wird Wärme gebunden und beim Erstarren wird Wärme frei. Die Schmelzwärme des Eises ist im Vergleich mit der Schmelzwärme anderer Substanzen sehr bedeutend, ein Umstand, der in der Natur eine sehr wichtige Rolle spielt. Im Frühjahr, wenn das im Winter gebildete Eis schmilzt, werden ungeheure Mengen Wärme gebunden. Beim Eintritt des Frostwetters im Herbst wird diese Wärme wieder frei. Hierdurch wird der Übergang von der kalten zur warmen Jahreszeit und umgekehrt verlangsamt.

§ 51. Gleichzeitig mit Black hatte Johann Karl Wilcke die Schmelzwärme gemessen.

Wilcke war 1732 in Wismar geboren, wo sein Vater Geistlicher war. Dieser wurde 1739 als Geistlicher der deutschen Gemeinde nach Stockholm berufen. Der Sohn studierte zuerst in Upsala und dann in Göttingen und Rostock. Später war er eine zeitlang in Berlin, kam aber 1759 nach Stockholm, um hier Vorlesungen über Physik zu halten. Im Jahre 1784 wurde er Mitglied und später Sekretär der schwedischen Akademie. Er starb 1796. Wir werden Wilcke noch auf einem anderen Gebiete der Physik begegnen. Er muß aber hier zusammen mit Black genannt werden, weil diese beiden ausgezeichneten Forscher, und zwar unabhängig voneinander, außer der Schmelzwärme noch eine andere wichtige Wärmeerscheinung erkannt haben.

Bereits in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts wußte man, daß man durch Vermischen gleicher Mengen Wasser, von denen die eine 10° und die andere 20° warm ist, ein Gemisch von 15° erhält. Sodann hatte Fahrenheit beobachtet, daß beim Vermischen gleicher Raumteile Wasser und Quecksilber, z. B. Wasser von 20° und Quecksilber von 10°, die Temperatur des Gemisches höher liegt als die Mitteltemperatur. Es hätte nahe gelegen, hieraus den Schluß zu ziehen, daß Wasser bei der Abkühlung um 1° mehr Wärme abgibt, als ein gleich großer Raumteil Quecksilber zur Erwärmung um 1° braucht, da die Erwärmung des Quecksilbers durch die vom Wasser abgegebene Wärme bewirkt wird. Dieser Schluß wurde jedoch aus dem Versuche Fahrenheits nicht gezogen. Man nahm vielmehr an, daß in gleichen Raummengen verschiedener Körper bei derselben Temperatur immer dieselbe Wärmemenge enthalten sei.

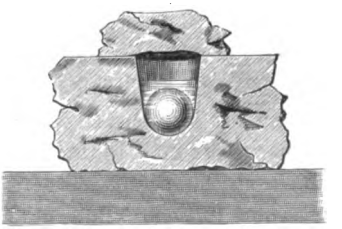
Digitized by Google

§ 52. Black gab für den Fahrenheitschen Versuch die folgende Erklärung. „Wir wollen annehmen, das Wasser habe 100° F, das Quecksilber 150° F gehabt. Die Mitteltemperatur zwischen 100° und 150° ist 125°, und wenn Wasser von 100° F mit einer gleich großen Menge Wasser von 150° F gemischt wird, so hat das Gemisch diese Mitteltemperatur. Das warme Wasser kühlt sich um 25° ab und das kalte Wasser erwärmt sich um dieselbe Anzahl von Graden. Nimmt man aber Quecksilber von 150° statt Wasser von 150°, so hat das Gemisch nur 120°. Das Quecksilber hat sich also um 30° abgekühlt, das Wasser aber hat sich nur um 20° erwärmt. Und doch ist die Wärmemenge, die das Wasser aufgenommen hat, genau dieselbe, welche das Quecksilber abgegeben hat. Dies beweist, daß ein und dieselbe Wärmemenge das Quecksilber stärker erwärmt als eine ebenso große Raummenge Wasser. Quecksilber erfordert also zur Erwärmung um eine gewisse Anzahl von Graden eine geringere Wärmemenge als Wasser."

Black bezeichnete dieses Verhalten des Quecksilbers dadurch, daß er sagte, das Quecksilber habe eine geringere Kapazität für Wärme, die damals noch als eine Art Materie betrachtet wurde. Später bezog man die Wärmekapazität oder spezifische Wärme[1]) nicht auf gleiche Raummengen, sondern auf gleiche Gewichtsmengen. Die spezifische Wärme ist die Anzahl der Wärmeeinheiten, welche die Gewichtseinheit eines Körpers braucht, um sich um 1° C zu erwärmen. Die spezifische Wärme des Wassers ist 1, d. h. ein Gramm Wasser braucht eine Wärmeeinheit, um sich um 1° C zu erwärmen.

§ 53. Black gab zwei verschiedene Methoden für die Bestimmung der spezifischen Wärme an. Die eine besteht darin, daß man eine kleine Kugel, die aus dem betreffenden Stoffe besteht, auf eine bestimmte Temperatur erwärmt und dann im Innern eines Eisstückes auf 0° erkalten läßt (Fig. 50). Die Menge des geschmolzenen Eises wird durch Aufsaugen des gebildeten Wassers vermittelst eines Schwammes und Wägen desselben vor und nach dem Einsaugen des Wassers ermittelt. Aus der Menge des geschmolzenen Eises, dem Gewicht und der Anfangstemperatur der Kugel ergibt sich dann die spezifische Wärme in folgender Weise.

Fig. 50.



Blacks Bestimmung der spezifischen Wärme.

Beispiel. Eine 8 g wiegende kupferne Kugel wird auf 100° erwärmt und dann im Eisblock abgekühlt. Durch Wägung wird ermittelt, daß 1 g Eis geschmolzen ist. Wie groß ist die spezifische Wärme des Kupfers? Antwort: Da die kupferne Kugel, indem sie sich von 100° auf 0° abkühlte, 1 g Eis geschmolzen hat, hat sie 80 Wärmeeinheiten abgegeben. Für jeden Grad, um den sich die Kugel abgekühlt hat, hat sie also 0,8 Wärmeeinheiten

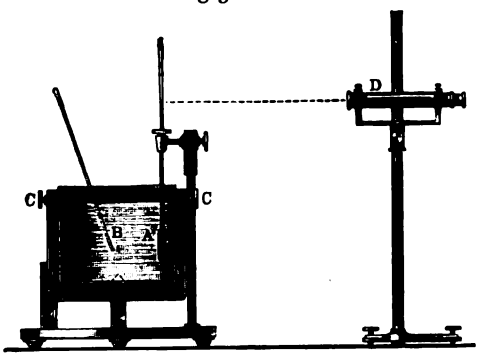
[1]) Diese Bezeichnung wurde 1784 von Johan Gadolin in Abo eingeführt.

Digitized by Google

abgegeben. Ein Gramm Kupfer gibt also bei der Abkühlung um einen Grad 0,1 Wärmeeinheiten ab, d. h. die spezifische Wärme des Kupfers ist 0,1.

Die andere Methode, deren sich Black zur Bestimmung der spezifischen Wärme bediente, besteht darin, daß der Körper auf eine bestimmte Temperatur erwärmt und dann in eine bestimmte Menge Wasser von bekannter Temperatur eingetaucht wird. Die zu derartigen Versuchen dienenden Apparate, die sogenannten Kalorimeter (d. h. Wärmemesser), wurden später sehr vervollkommnet. Ein Instrument dieser Art, wie es heutzutage in Gebrauch ist, ist in Fig. 51 abgebildet. Ein auf der Außenseite poliertes Metallgefäß ruht auf den Lappen *E*, die mit Kork oder Elfenbein belegt sind, und wird durch die beiden Stellschrauben *C* gestützt, deren Enden ebenfalls mit Kork oder Elfenbein belegt sind. Dieses Gefäß steht in einem zweiten, dessen Innenseite poliert ist. Hierdurch ist das innere gegen Wärmeverlust durch Ausstrahlung geschützt, da die vom inneren Gefäß ausgehenden Wärmestrahlen von der Wand des äußeren Gefäßes zurückgeworfen werden. Ein Wärmeverlust durch Leitung wird durch die erwähnten Kork- oder Elfenbeinbelegungen verhindert, da diese Substanzen schlechte Wärmeleiter sind. Wenn ein Versuch nur kurze Zeit in Anspruch nimmt und die Temperatur des Wassers nur wenig von der Temperatur der Luft abweicht, so ist der Wärmeverlust fast unmerklich. Unter den entgegengesetzten Bedingungen muß an der abgelesenen Temperatur eine Korrektion angebracht werden. Das Gefäß enthält eine bestimmte Menge Wasser. *A* ist ein feines Thermometer und *B* ein Rührstab. Bevor man die Temperatur ablieſt, muß das Wasser umgerührt werden, damit man sicher ist, daß im Kalorimeter überall dieselbe Temperatur herrscht.

Fig. 51.



Kalorimeter und Kathetometer.

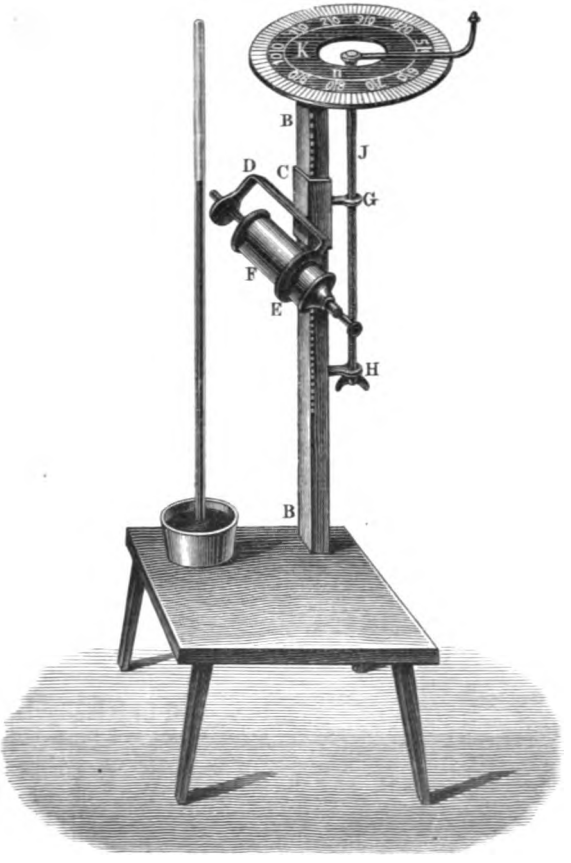
Wir wollen annehmen, das Kalorimeter enthalte 64 g Wasser von 15° C, der Temperatur des Zimmers. Um die spezifische Wärme des Schwefels zu bestimmen, werden 10 g auf 48° erwärmt und in das Wasser gebracht. Die Temperatur des Wassers steigt dabei um 1°. Wasser und Schwefel haben jetzt dieselbe Temperatur, nämlich 16°. Das Wasser hat vom Schwefel 64 Wärmeeinheiten aufgenommen, und der Schwefel hat dieselbe Wärmemenge abgegeben, indem er sich von 48° auf 16°, also um 32° abkühlte. Hieraus ergibt sich, daß 1 g Schwefel beim Abkühlen um einen Grad 0,2 Wärmeeinheiten abgibt, daß also seine spezifische Wärme 0,2 ist.

Wenn derartige Versuche ein sehr genaues Resultat liefern sollen, so muß

Digitized by Google

darauf Rücksicht genommen werden, daß nicht nur das Wasser, sondern auch das Kalorimeter, das Thermometer und der Rührstab erwärmt werden. Wenn an der beobachteten Temperatur des Gemisches eine Korrektion wegen des Wärmeverlustes angebracht werden soll, so muß während der ganzen Dauer des Versuches der Gang des Thermometers sehr genau beobachtet werden. Dies geschieht vermittelst eines Fernrohres, welches mit einem Fadenkreuz versehen ist (I, § 104) und welches an einem vertikalen Maßstab aufwärts und abwärts verschoben werden kann.

Fig. 52.



Grays Kathetometer.

Dieses Instrument, das sogen. **Kathetometer**, spielt bei vielen physikalischen Messungen eine große Rolle, wenn es sich darum handelt, Höhendifferenzen mit großer Genauigkeit zu ermitteln. Der Erfinder des Instrumentes ist Stephan Gray (gest. 1736), der, wie wir später sehen werden, auch auf dem Gebiete der Elektrizitätslehre eine wichtige Entdeckung gemacht hat. Sein erstes Kathetometer, zur Ablesung eines Barometerstandes eingestellt, ist in Fig. 52 abgebildet. Das an dem Muff C befestigte Instrument EF ist nicht ein Fernrohr, sondern ein Mikroskop. Die Verschiebung des Muffes samt dem Mikroskop wurde durch Drehung der in die Schraubenmutter G eingreifenden Schraube JH bewirkt. Die Ganghöhe der Schraube war sehr klein, und vermittelst des Schraubengriffes konnten auf einer geteilten Scheibe kleine Bruchteile einer Umdrehung abgelesen werden.

§ 54. Die spezifische Wärme gasförmiger Körper kann in einem Kalorimeter gemessen werden, indem man das Gas durch ein von dem Wasser umgebenes Schlangenrohr strömen läßt. Nachdem eine bestimmte Menge des Gases das

Digitized by Google

Rohr durchſtrömt hat, wird beobachtet, um wieviel Grad die Temperatur des Waſſers geſtiegen iſt. Da die Ausführung derartiger Verſuche ziemlich zeitraubend iſt, ſo muß eine höchſt ſorgfältige Korrektion für den Wärmeverluſt vorgenommen werden. Auf die Einzelheiten des Verfahrens kann hier nicht näher eingegangen werden. Um die Beſtimmung der ſpezifiſchen Wärme hat ſich H. Regnault (vgl. § 84) beſonders verdient gemacht.

In der folgenden Tabelle ſind die ſpezifiſchen Wärmen einiger Körper zuſammengeſtellt.

Waſſer	1	Platin	0,033
Eis	0,5	Blei	0,031
Eiſen	0,114	Spiritus	0,602
Kupfer	0,095	Benzol	0,386
Zink	0,096	Luft	0,237
Silber	0,057	Sauerſtoff	0,217
Zinn	0,055	Stickſtoff	0,244
Queckſilber	0,033	Waſſerſtoff	3,409 [1])

Die große ſpezifiſche Wärme des Waſſers ſpielt in der Natur eine ähnliche Rolle wie die große Schmelzwärme des Eiſes (§ 50). Im Sommer erwärmt die Sonne das Waſſer, und jedes Pfund nimmt für jeden Grad, um den es erwärmt wird, eine Wärmeeinheit auf. Dieſe Wärme wird dann ſpäter wieder an die kalte Luft abgegeben und trägt in hohem Grade dazu bei, die Abkühlung der Luft zu verzögern.

Dampf.

§ 55. Daß Waſſer zu „Luft“ werden kann, iſt eine alltägliche Erfahrung. Feuchte Gegenſtände werden an der Luft trocken, und Waſſer, welches in einem Gefäß enthalten iſt, verſchwindet nach und nach, indem es ſich in „Luft“ verwandelt. Die Völker des Altertums kannten dieſe Erſcheinung gerade ſo gut wie wir. Ebenſo wußten ſie, daß beim Erwärmen des Waſſers die Umwandlung in „Luft“ ſchneller vor ſich geht und daß, wenn die Hitze bis zu einem gewiſſen Grade geſteigert wird, das Waſſer ins Sieden kommt, d. h. daß die Umwandlung nicht nur geräuſchlos an der Oberfläche vor ſich geht, ſondern daß die ganze Waſſermaſſe in eine brodelnde

[1]) Bei gasförmigen Körpern hat man zwei verſchiedene ſpezifiſche Wärmen zu unterſcheiden, die ſpezifiſche Wärme bei konſtantem Druck und die ſpezifiſche Wärme bei konſtantem Volum. Die Zahlen der Tabelle bedeuten die erſtere. Die letztere iſt kleiner, und zwar verhält ſie ſich zur erſteren wie 1 : 1,4. Anm. d. Überſ.

Digitized by Google

und wallende Bewegung kommt, indem „Luftblasen“ am Boden des Gefäßes entstehen, durch das Wasser emporsteigen und in die Luft entweichen.

Die Alten hatten ohne Zweifel auf ihren Kochtöpfen und Kesseln Deckel, und sie beobachteten, daß die beim Sieden des Wassers entstehende „Luft“ die Deckel mit großer Kraft heben konnte.

Auf diese Weise hatte man in weit zurückliegenden Zeiten gelernt, daß die aus dem Wasser entstehende „Luft“ einen viel größeren Raum einnimmt als das Wasser selbst. Versucht man daher, die „Luft“ in einem kleinen Raum zu halten, so übt sie einen Druck gegen die Gefäßwand aus. Bereits Aristoteles hat eine Vorstellung davon gehabt, daß der Druck der „Luft“ unter diesen Umständen sehr groß sein kann, denn er erklärt die Erdbeben dadurch, daß sich das Wasser in der Erde plötzlich in „Luft“ verwandelt, die mit unwiderstehlicher Kraft einen großen Raum einzunehmen strebt und infolgedessen die Erde erschüttert.

Aristoteles macht ebenso wenig wie andere Schriftsteller des Altertums einen Unterschied zwischen der gewöhnlichen Luft und derjenigen „Luft“, die aus dem Wasser entsteht. Dagegen wußte er, daß die letztere Luft in der Kälte wieder zu Wasser wird. Er erwähnt, daß der Tau am reichlichsten in kalten klaren Nächten fällt, und daß das Wasser, welches durch Abkühlung der aus dem Meereswasser entstehenden „Luft“ entsteht, keinen salzigen Geschmack hat.

Wir wollen aus praktischen Gründen im folgenden das luftförmige Wasser als Dampf bezeichnen. Wenn dieser wieder in Wasser übergeht, so sagt man, er verdichte sich. Die Völker des Altertums wußten also, daß sich der Dampf beim Abkühlen verdichtet.

Fig. 53.

Herons tanzende Kugel.

§ 56. Heron hat den Umstand, daß der Dampf einen größeren Raum einnimmt als das Wasser, zur Konstruktion verschiedener Apparate benutzt. In Fig. 53 ist Herons tanzende Kugel abgebildet, die von dem Dampf schwebend gehalten wird, der aus einem Rohr austritt, das aus dem dicht schließenden Deckel eines Metallgefäßes hervorragt. Das Gefäß wird zur Hälfte mit Wasser gefüllt und auf Feuer gestellt. Wenn nun die Größe des Gefäßes zur Weite des Rohres im richtigen Verhältnis steht, so kann der Dampfstrahl die Kugel tragen, und diese bewegt sich aufwärts und abwärts, je nachdem sie vom Dampfstrahl mehr oder weniger zentral getroffen wird.

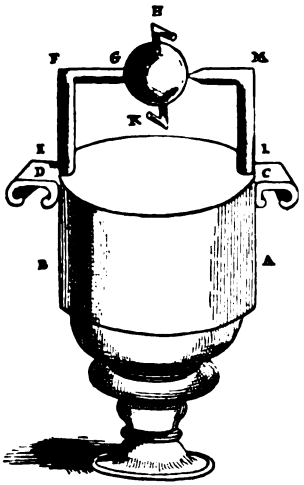
Ein anderer von Herons Dampfapparaten ist in Fig. 54 abgebildet. In dem Metallgefäße *AB*, welches durch einen Deckel luftdicht verschlossen ist, kann Wasser zum Sieden gebracht werden. Der Dampf strömt durch das Rohr *EFG* in eine kleine Kugel, die auf der entgegengesetzten Seite durch

Digitized by Google

das Winkelstück LM so gestützt wird, daß sie sich um die Achse FGM drehen kann. Das Innere der Kugel steht mit der Luft durch zwei knieförmig gebogene Röhren H und K in Verbindung. Wenn nun das Wasser in dem Gefäß zum Sieden gebracht wird, so strömt der Dampf durch die Röhren H und K aus und die Kugel kommt in drehende Bewegung.

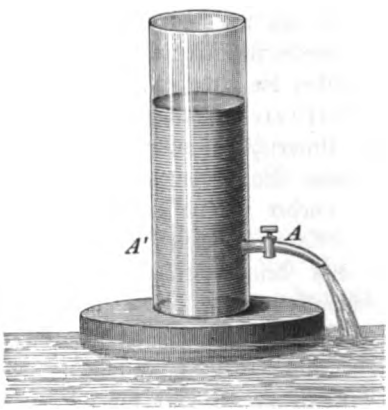
In welcher Weise die Bewegung der Kugel zustande kommt, wird durch den in Fig. 55 abgebildeten Apparat veranschaulicht. Auf einer schwimmenden

Fig. 54.



Herons Äolipile.

Fig. 55.



Aufhebung des Seitendruckes.

Korkplatte steht ein mit Wasser gefüllter Glaszylinder. A ist ein mit einem Hahn versehenes Ausflußrohr. Wenn nun der Hahn geöffnet wird, so bewegt sich der Apparat nach der entgegengesetzten Seite. Indem nämlich das Wasser aus dem Rohr ausströmt, hört der Seitendruck auf denjenigen Teil der Gefäßwand, die von dem Rohr eingenommen wird, auf. Der Druck auf das gegenüberliegende Stück A' der Gefäßwand setzt den Apparat in Bewegung (vgl. I, § 193). Dieselbe Wirkung macht sich beim Abfeuern einer Kanone geltend. Beim Abfeuern des Geschosses läuft die Kanone rückwärts, da der Druck im Innern des Rohres nur nach hinten wirkt.

In dem Heronschen Apparat ist kein Druck gegen die Öffnungen der knieförmigen Röhren vorhanden. Der Seitendruck nach der entgegengesetzten Richtung setzt die Kugel in Bewegung.

Dieser Apparat, die sogenannte Äolipile, ist weiter nichts als ein interessantes Spielzeug. Heron selbst hat wohl kaum daran gedacht, die rotierende Kugel als Triebkraft für Maschinen zu benutzen. Wenn aber der Dampfkessel und die Feuerung im Verhältnis zu den Ausströmungsöffnungen so gebaut werden, daß der Dampf mit großer Geschwindigkeit, also mit großer Kraft ausströmt, so wird auch die Kugel mit großer Kraft gedreht.

Digitized by Google

Heutzutage werden Dampfmaschinen konstruiert, die auf einem ähnlichen Prinzip beruhen wie Herons Äolipile. Es sind dies die sogenannten Dampfturbinen (oder Reaktionsmaschinen). Sie sind im Bau einfacher, aber im Betrieb kostspieliger als die gewöhnlichen Dampfmaschinen. Sie finden namentlich da Anwendung, wo es sich um Erzielung einer sehr großen Umdrehungsgeschwindigkeit handelt.

Heron war also nicht weit davon entfernt, eine der heute gebräuchlichen Arten von Dampfmaschinen zu erfinden. Aber er hat jedenfalls keine Ahnung von der Tragweite seiner Erfindung gehabt. Hätte er den Bau von Kraftmaschinen im Auge gehabt, so hätte er vielleicht versucht, seine Äolipile zu verbessern.

Der römische Baumeister Vitruvius, der zu Anfang der christlichen Zeitrechnung lebte, beschreibt in seinem Werke „de architectura" ausführlich die Heronsche Dampfkugel, führt aber den Gedanken nicht weiter. Aber durch die Schriften Vitruvs wurden die römischen Techniker mit Heron bekannt, und im 16. Jahrhundert wird die Äolipile in einer Erklärung zu Vitruvs Werken von Cesare Cesariano erwähnt.

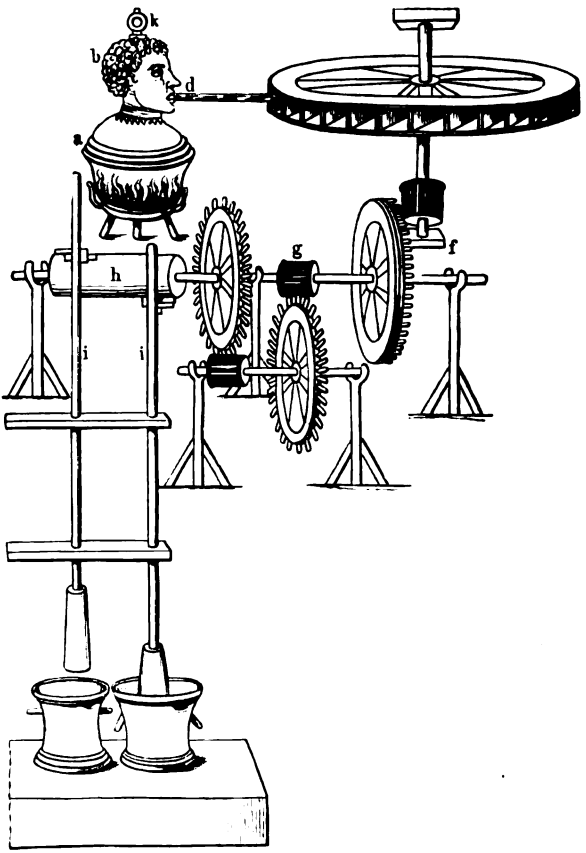
Aus diesem langen Zeitraum von 1500 Jahren sind nur wenige Nachrichten erhalten, aus denen hervorgeht, daß man sich mit dem Wasserdampf beschäftigt hat. Einzelne Erzählungen deuten jedoch darauf hin, daß der Dampfdruck nicht in Vergessenheit geraten war. So wird erzählt, der Erbauer der Sophienkirche in Konstantinopel, Anthemius (um 530), habe, um sich an seinem Nachbar, dem Redner Zeno, mit dem er in Streit lebte, zu rächen, in seinem Keller einen Dampfkessel gebaut und den Dampf durch ein verborgenes Rohr in das Haus Zenos geleitet. Hier ließ er den Dampfdruck mit solcher Kraft auf die Balken wirken, daß das ganze Haus erschüttert wurde. Zeno glaubte, die Erschütterung sei durch ein Erdbeben verursacht, und er erklärte, er wolle lieber das Haus verlassen, als der Nachbar eines Mannes sein, der über den Dreizack Neptuns verfüge. — Im 10. Jahrhundert erbaute der Bischof Gerbert, der spätere Papst Sylvester II., für die Kirche in Reims eine Orgel, die mit Dampf statt mit Luft geblasen wurde. — Ferner kann erwähnt werden, daß man eine wendische Götterstatue gefunden hat, deren Bauch mit Wasser gefüllt wurde und die aus dem Munde Dampf ausstieß, wenn sie auf Feuer gesetzt wurde.

Der bereits erwähnte Cesare Cesariano gab 1521 seinen Kommentar zu Vitruv heraus, und in diesem spricht er ausführlich davon, daß der Dampf aus der Äolipile, d. h. einem Dampftopf mit einem Rohr im Deckel, mit großer Kraft ausströmt. Man hat aus seiner Beschreibung den Schluß gezogen, daß die Äolipile damals als Kriegswerkzeug, vielleicht zum Schleudern oder auch zum Spritzen gedient hat. Mehrere Schriften aus dem 16. Jahrhundert und dem Anfang des 17. Jahrhunderts deuten darauf hin, daß das Studium der Werke Vitruvs und Herons die Veranlassung zu den ersten Versuchen gegeben hat, den ausströmenden Dampf als Triebkraft zu verwenden.

Digitized by Google

§ 57. So versuchte ein Schiffskapitän Blasco de Garay im Jahre 1543 im Hafen von Barcelona ein Schiff durch Räder fortzubewegen, die durch Dampf getrieben wurden. In welcher Weise der in einem großen Kessel erzeugte Dampf auf die Räder wirkte, ist nicht bekannt. Daß Garay eine Dampfmaschine gehabt hat, ist nicht wahrscheinlich. Vielleicht hat er den Dampf wie einen Luftstrom gegen die Radschaufeln wirken lassen. Wir finden

Fig. 56.



Brancas Dampfmühle (1629).

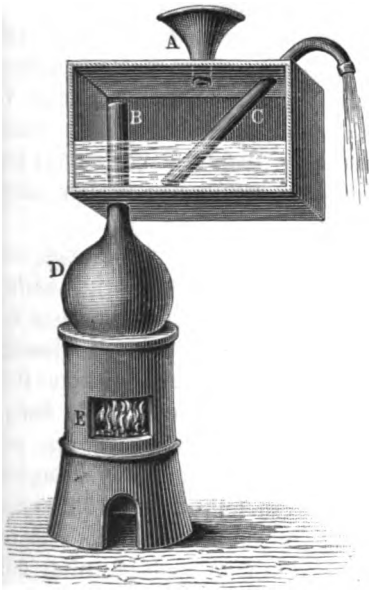
nämlich in der folgenden Zeit die sogenannten Dampfmühlen, z. B. bei dem italienischen Ingenieur Giovanni Branca, der 1629 eine Art Maschinenlehre herausgab, aus welcher Fig. 56 entnommen ist. *a* ist ein Dampfkessel, dessen Deckel die Gestalt eines menschlichen Kopfes hat, der ein Rohr im Munde hält. Durch dieses Rohr strömt der Dampf gegen ein Schaufelrad und setzt dieses in Bewegung. Wie aus der Figur ersichtlich ist, dachte Branca, eine solche Dampfmühle könne zum Betrieb eines Stampfwerkes dienen. Praktische Anwendung hat sie jedoch schwerlich gefunden, da der

Digitized by Google

Dampfverbrauch im Vergleich zu der geleisteten Arbeit viel zu groß gewesen sein würde.

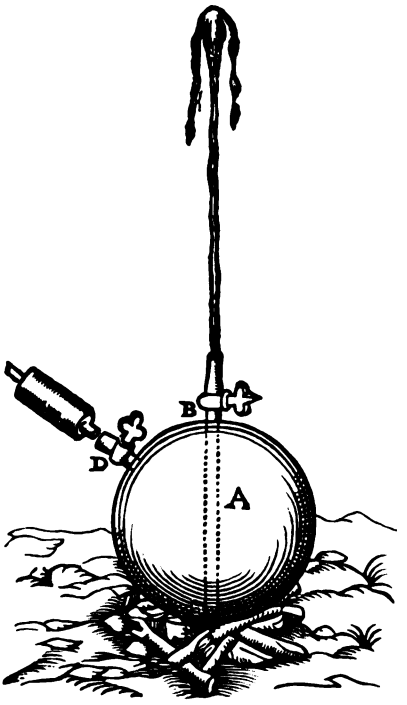
§ 58. Noch vor dem Erscheinen von Brancas Buch hatte Della Porta versucht, das Volum des Dampfes zu messen, der aus einem bestimmten Volum Wasser entsteht. Die Ausführung des Versuches wird durch Fig. 57 veranschaulicht. Der Hals des flaschenförmigen Metallgefäßes *D* geht wasserdicht durch den Boden des größeren Behälters. Wenn das Wasser in *D* erwärmt wird, so steigt der entstehende Dampf in den größeren Behälter

Fig. 57.



Portas Messung des Dampfvolums.

Fig. 58.



Heben von Wasser durch Dampfdruck.

und drückt das Wasser durch das Rohr *C* hinaus. Porta nahm an, die ausgetretene Wassermenge gebe das Volum des Dampfes an. Dies ist jedoch nicht richtig, weil der Dampf zum Teil verdichtet wird, wenn er mit dem kalten Wasser in Berührung kommt. Diese Messung des Dampfvolums hat daher keine Bedeutung, aber der Apparat kann dazu dienen, Wasser durch Dampf in die Höhe zu drücken.

Zu Anfang des 17. Jahrhunderts wurden verschiedene Apparate vorgeschlagen, die dazu dienen sollten, Wasser durch Dampfdruck zu heben. Salomon de Caus (1576 bis 1626), ein vielgereister Mann, schrieb 1615 ein Buch über „bewegende Kräfte", in welchem er die in Fig. 58 abgebildete Vorrichtung zum Heben des Wassers beschreibt. *A* ist eine kupferne Hohlkugel, in welche durch das Rohr mit dem Hahn *D* Wasser eingegossen werden kann.

Digitized by Google

Ein anderes Rohr, welches ebenfalls mit einem Hahn versehen ist, geht bis fast auf den Boden der Kugel hinab. Wenn die Kugel zur Hälfte mit Wasser gefüllt und dann erhitzt wird, während der Hahn *D* geschlossen, der Hahn *B* dagegen geöffnet ist, so drückt der entstehende Dampf auf das Wasser und drückt es durch das Rohr *CA* in die Höhe. Wenn der Dampfdruck hinreichend groß ist, wird das Wasser auf eine beträchtliche Höhe emporgeschleudert.

Das Buch Salomon de Caus' zerfällt in zwei Abteilungen, von denen die eine über „Theoreme", die andere über „Maschinen" handelt. Da der beschriebene Apparat in der ersten Abteilung erwähnt wird, darf man wohl annehmen, daß der Verfasser den Apparat nicht wirklich zum Wasserheben benutzt, sondern nur als eine dazu geeignete Vorrichtung beschrieben hat.

§ 59. De Caus war am englischen Hof als Wasserbauingenieur für den Schloßgarten in Richmond angestellt. Außerdem war er Zeichenlehrer der Prinzessin Elisabeth. Als sich diese mit dem Kurfürsten Friedrich V. von der Pfalz vermählte, folgte ihr de Caus nach Heidelberg, wo unter seiner Leitung der Schloßgarten angelegt wurde. Auch hier hat er bei der Anlegung von Springbrunnen, wie es scheint, das Heben von Wasser durch Dampfdruck nicht praktisch ausgeführt.

Dagegen steht fest, daß 30 Jahre nach dem Erscheinen des Buches von de Caus ein brauchbarer Wasserhebeapparat, der durch Dampfdruck wirkte, von Edward Somerset, Marquis von Worcester, konstruiert worden ist.

Somerset gehörte einem der reichsten Adelsgeschlechter an. Er sowohl als auch sein Vater waren Anhänger Karls I. und Gegner Cromwells. Sie rüsteten auf eigene Kosten ein Korps von 2000 Mann aus. Die königlichen Truppen wurden aber bekanntlich von den Parlamentstruppen geschlagen. Die Güter des Marquis wurden eingezogen und er selbst mußte ins Ausland flüchten. Er begab sich nach Frankreich und brachte hier einige Jahre zu. Er hatte Interesse für mechanische Instrumente und Maschinen und hat sich während seines Aufenthalts in Frankreich wahrscheinlich mit derartigen Dingen beschäftigt.

Im Jahre 1656 kam er in einer geheimen politischen Mission nach England, wurde erkannt und eingekerkert. Erst 1661, nachdem Karl II. zur Regierung gekommen war, wurde er wieder in Freiheit gesetzt. Sein Vermögen, welches er den Interessen des Königtums und der kirchlichen Partei geopfert hatte, wurde ihm jedoch nicht zurückerstattet. Er starb 1667 in dürftigen Verhältnissen.

Er veröffentlichte 1663 eine kleine Schrift, in welcher er 100 Erfindungen beschreibt, die er teils selbst gemacht, teils verbessert hat. Er gibt keine genauen Beschreibungen dieser Erfindungen, sondern nur mehr oder weniger unverständliche Andeutungen derselben, und er vermengt unausführbare Projekte mit wirklich nützlichen Anweisungen. Es ist daher nicht zu verwundern, daß er vielfach als ein Charlatan betrachtet wurde, der mit der Schrift nur Aufsehen erregen will, der aber von den Dingen, über die er schreibt, selbst nichts

Digitized by Google

versteht. In dem Werke befindet sich die folgende Stelle (§ 68) über eine Wasserhebemaschine:

„Eine merkwürdige, aber äußerst kräftige Art, Wasser zu heben, nicht dadurch, daß es hinaufgedrückt oder hinaufgesogen wird, denn dies ist, wie die Naturforscher sagen, nur intra sphaeram activitatis, also innerhalb sehr enger Grenzen möglich. Das Mittel, von dem hier die Rede ist, findet keine Grenzen (für die Höhe, auf welche das Wasser gehoben werden kann), wenn nur die Gefäße stark sind. Ich nahm eine Kanone, von der am Ende ein Stück abgesprungen war, füllte drei Viertel des Hohlraumes mit Wasser, verschloß die Mündung und das Zündloch und versah das Ganze solid mit Schrauben. Das Rohr erhitzte ich ununterbrochen 24 Stunden und die Kanone zersprang mit einem heftigen Knall. Ich habe also ein Mittel, meine Gefäße so einzurichten, daß sie mit der in ihnen vorhandenen Kraft geleert und gefüllt werden können.

Ich habe Wasser in einem zusammenhängenden Strahl, wie in einem Springbrunnen, aus einem Rohr 40 Fuß in die Höhe strömen sehen. Ein (geschlossenes) Gefäß, gefüllt mit Wasser, welches durch das Feuer verdünnt war, hob kaltes Wasser 40 Fuß hoch, und ein Arbeiter, der die Maschine beaufsichtigte, brauchte nur zwei Hähne zu drehen, damit, wenn der eine Wasserbehälter leer ist, ein anderer zu wirken anfangen kann, während sich der erste wieder mit Wasser füllt u. s. w. Das Feuer muß gleichmäßig erhalten werden. Dies besorgt aber der Arbeiter leicht in der Zeit, welche zwischen der Drehung des einen und des anderen Hahnes liegt."

Auch an zwei anderen Stellen des Buches (§ 98 und 100) wird die Wasserhebemaschine erwähnt. Im letzteren Paragraphen, der das Buch abschließt, heißt es: „Durch dieses merkwürdige Hilfsmittel, welches die beiden zuletzt genannten Erfindungen bieten, habe ich nach jahrelanger Arbeit eine Wasserhebemaschine zustande gebracht, vermittelst deren durch die Kraft eines Kindes eine unglaubliche Menge Wasser 100 Fuß hoch gehoben werden kann, sogar in einem 2 Fuß weiten Rohr; und dies geschieht so natürlich, daß die Maschine nicht einmal in einem anstoßenden Zimmer gehört wird, und so leicht und einfach, daß, selbst wenn die Maschine ein ganzes Jahr lang Tag und Nacht in Tätigkeit wäre, die Kosten sich nicht auf 40 Schilling belaufen würden. Ich kann die Maschine ohne Übertreibung das größte Wunderwerk der Welt nennen.

Ich glaube daher mit Recht, daß diese Erfindung meine Arbeiten krönt und mich für alle meine Auslagen schadlos halten wird, so daß ich nicht mehr nötig habe, meine Gedanken auf neue Erfindungen zu richten.

Hiermit ist das Hundert voll und ich will den Leser nicht weiter ermüden, denn ich beabsichtige der Nachwelt ein Werk zu schenken, welches erklären soll, wie die genannten Erfindungen auszuführen sind und welchem Kupfertafeln mit Zeichnungen aller zugehörigen Teile beigegeben werden sollen.

In bonum publicum et ad majorem dei gloriam."

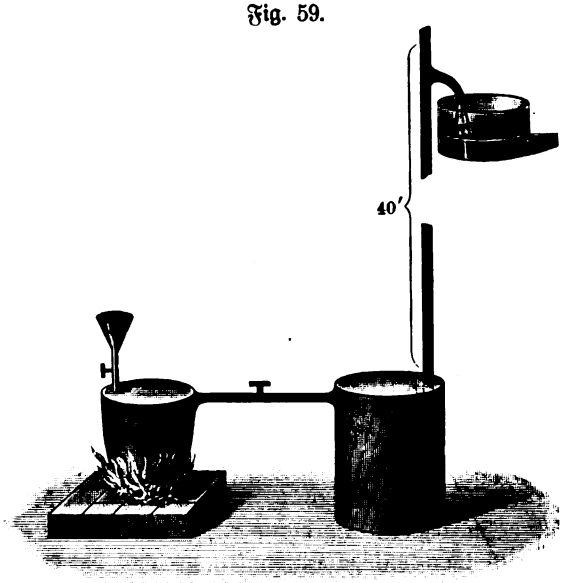
Leider ist das versprochene Werk niemals erschienen. Wir können daher

Digitized by Google

nicht mit Bestimmtheit angeben, wie Somersets Maschine ausgesehen hat. Aber sie hat wohl ungefähr die aus Fig. 59 ersichtliche Einrichtung gehabt.

Ist nun diese Maschine wirklich in Tätigkeit gewesen? Viele haben diese Frage verneint. Somerset wurde lange Zeit für einen Phantasten und Projektmacher gehalten. Unter seinen hinterlassenen Papieren hat man jedoch den Beweis gefunden, daß er selbst seine Maschine in Tätigkeit gesehen hat. Er hat nämlich das Dankgebet zu Gott niedergeschrieben, welches er betete, „als er zum erstenmal mit eigenen Augen einen wohlgelungenen Versuch mit der Maschine sah". Das Gebet lautet folgendermaßen: „O unendlicher und allmächtiger Gott, Deine Barmherzigkeit hat keine Grenzen. Deine Weisheit ist unermeßlich und unerschöpflich. Ich danke Dir zuerst, daß Du mich erschaffen und mir Heil hast widerfahren lassen. Dann aber sage ich Dir aus dem Innersten meines Herzens demütigen Dank dafür, daß Du mir Einsicht in ein Geheimnis vergönnt hast, welches so groß und für alle Menschen so wertvoll ist wie meine Wasserhebemaschine. Bewahre mich nun davor, o Herr, daß meine Kenntnis dieser und vieler seltener und unvergleichlicher Erfindungen, Einrichtungen und Versuche mich aufgeblasen mache, sondern züchtige mein hochmütiges Herz, indem Du mich meine unwissende, schwache und unwürdige Natur erkennen lässest, die von allem Bösen versucht wird."

Fig. 59.



Vermutliche Einrichtung von Somersets Wasserhebemaschine.

Allein trotz dieses Aktenstückes waren nicht alle Zweifel beseitigt. Man hat annehmen wollen, Somerset habe sich dermaßen in den Gedanken, daß die Aufgabe gelöst sei, hineingelebt, daß er im voraus das Gebet aufgesetzt habe, in welchem er Gott für die Lösung der Aufgabe dankt, die er so sehnsüchtig erstrebte.

Daß die Maschine jedoch wirklich praktische Anwendung gefunden hat, hat noch in anderer Weise seine Bestätigung gefunden.

Der Sohn des Großherzogs Ferdinand II. von Toskana, Prinz Cosimo, unternahm unter der Leitung Magalottis eine Reise ins Ausland

Digitized by Google

und die Erlebnisse auf dieser Reise wurden sorgfältig in ein Tagebuch eingetragen. Sie kamen auf dieser Reise nach London und sahen hier die Maschine Somersets. Es heißt in dem Tagebuch: „Damit Seine Hoheit (Prinz Cosimo) den Tag nicht mit unnützen Dingen zubringe, besuchten wir den anderen Teil der Stadt und sahen hier in einem Garten in der Nähe des Palais des Erzbischofs von Canterbury eine hydraulische Maschine, die vom Lord Somerset, Marquis von Worcester, erfunden worden ist. Sie hebt Wasser 40 Fuß hoch und wird von einem einzigen Manne bedient. In sehr kurzer Zeit füllt sie durch ein Rohr, welches nur $^1/_4$ Fuß Durchmesser hat, vier Behälter mit Wasser. Man sagt, sie sei nützlicher als eine andere Maschine in Somersethouse, die von zwei Pferden in Bewegung gesetzt wird."

Lord Somersets Maschine war also jedermann zugänglich, aber sie fand trotzdem keine Verbreitung. Hierbei haben wahrscheinlich verschiedene Gründe mitgewirkt. Der Erfinder hatte 1663 vom Parlament ein Patent erhalten, welches ihm und seinen Erben das ausschließliche Recht der Herstellung für 90 Jahre sicherte und anordnete, daß jeder, der die Maschine ohne Erlaubnis nachahmte und benutzte, für jede Stunde 5 Pfund Sterling Strafe zahlen sollte. Hiermit war aber jede Verbesserung der sehr unvollkommenen Maschine unmöglich gemacht. Ferner war die Herstellung einer derartigen Maschine damals überhaupt mit Schwierigkeiten verbunden. Die Gelehrten nahmen sich der Sache nicht an. Lord Somerset gehörte nicht zu ihren Kreisen und seine Schrift war zu oberflächlich, als daß sie die Beachtung der englischen Gesellschaft der Wissenschaften hätte finden können. Nach seinem Tode sind, wie es scheint, seine Arbeiten alsbald in Vergessenheit geraten.

§ 60. Schon vor der Aufhebung des Edikts von Nantes wurden die Protestanten in Frankreich stark verfolgt, und nicht wenige hervorragende Männer verließen Frankreich, um in Frieden leben zu können. Zu diesen gehörte auch Denis Papin, geb. 1647 in Blois. Er studierte in Paris Medizin und Physik, absolvierte das erstere Studium mit der Promotion, wandte sich aber später ganz dem Studium der Physik zu. Großen Einfluß auf ihn hatte Huygens, der damals in Paris wirkte (vgl. I, § 161). Dieser nahm den jungen talentvollen Arzt als Assistent an und ließ ihn eine Reihe von Versuchen über den leeren Raum ausführen. Papin gab 1674 eine Schrift über diese Versuche heraus, die eine ausführliche Beschreibung der Luftpumpe enthält, welche zu diesen Versuchen benutzt wurde (vgl. I, § 255). Die Schrift ist Huygens gewidmet, und aus der Einleitung geht hervor, daß der Schüler mit dem älteren Lehrer in einem freundschaftlichen Verhältnis stand. Er schreibt: „Diese Versuche gehören Ihnen, denn ich habe so gut wie alle auf Ihre Veranlassung und unter Ihrer Beihilfe ausgeführt. Allein da ich weiß, daß die Versuche Ihnen nur zum Vergnügen dienen und daß Sie sich schwerlich entschließen werden, sie zu veröffentlichen, so fürchte ich nicht, daß Sie es mißbilligen werden, wenn ich es tue."

§ 61. Boyle hatte bereits 1660 beobachtet, daß lauwarmes Wasser ins Sieden kommt, wenn es unter die Glocke der Luftpumpe gebracht und

Digitized by Google

die Luft ausgepumpt wird. Papin bestätigte die Richtigkeit dieser Beobachtung und zeigte durch Versuche, daß der Siedepunkt einer Flüssigkeit von dem Druck abhängig ist, der auf der Oberfläche ruht. Wenn der Druck vermindert wird, so sinkt der Siedepunkt, und umgekehrt, wenn der Druck vergrößert wird, so steigt der Siedepunkt (vgl. Fahrenheits Thermobarometer, § 23).

Eine wichtige Anwendung findet diese Abhängigkeit des Siedepunktes vom Druck in dem sogenannten Papinschen Topf, den Papin in einer Schrift beschreibt, die 1681 in London erschien. Papin war im vorhergehenden Jahre nach London gekommen, wo er von Boyle freundschaftlich empfangen und in den Kreis der Royal Society eingeführt wurde.

Fig. 60.

Denis Papin.

Papins Dampftopf war ursprünglich zum Auskochen von Knochen bestimmt, was eine höhere Temperatur als 100° C erfordert. Der Topf ist im wesentlichen ein kleiner Dampfkessel (Fig. 61), d. h. ein eiserner Behälter mit dampfdicht aufgeschraubtem Deckel. Auf dem Deckel sitzt als wichtigster Teil des ganzen Apparates das Sicherheitsventil, eine kurze Röhre, die durch ein Ventil geschlossen ist, welches mittels eines belasteten Hebels niedergedrückt wird. Die Temperatur, bei welcher das Wasser im Kessel zum Sieden kommt, hängt von der Größe des Druckes ab, der auf dem Ventil lastet, und dieser Druck wird durch die Länge des Hebels und durch die Größe des Gewichtes bedingt.

Hätte z. B. das Ventil, gegen welches der Dampf drückt, einen Querschnitt von 1 qcm, so wäre der Luftdruck auf dasselbe gleich einem Kilogramm. Der Dampf entweicht erst dann, wenn er ebenfalls einen Druck von einem Kilogramm ausübt. Dieses findet bei 100°, dem gewöhnlichen Siedepunkt des Wassers, statt. Wird nun der Hebel des Ventils so belastet, daß er einen Druck von zwei Kilogramm auf das Ventil ausübt, so kann der Dampf erst dann entweichen, wenn er gegen das Ventil ebenfalls einen Druck von zwei Kilogramm ausübt. Dies ist bei 120,6° C der Fall.

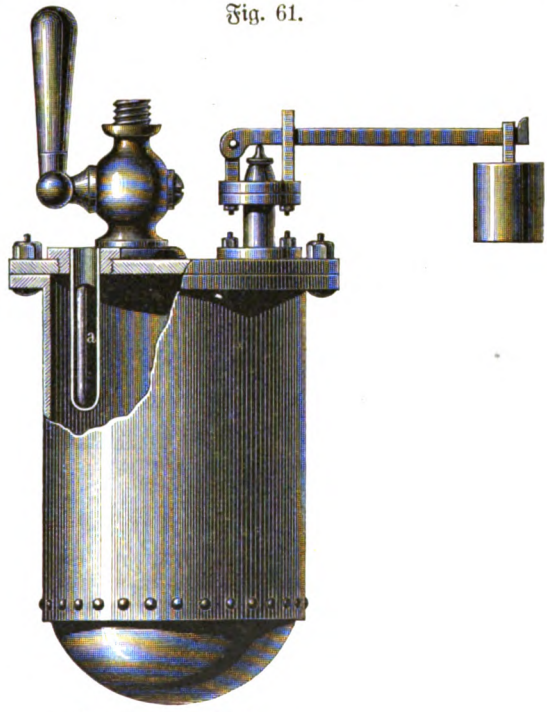
Wenn das Gewicht weiter nach dem Ende des Hebels hin verschoben wird, so wird das Ventil mit größerer Kraft niedergedrückt und der Dampfdruck muß größer werden, um das Ventil heben zu können. Man kann daher mit Hilfe des Sicherheitsventils die Größe des Dampfdruckes regulieren und

Digitized by Google

einem Zerſpringen des Keſſels vorbeugen. Ohne das Sicherheitsventil iſt der Dampfkeſſel ein ſehr gefährlicher Apparat, der ohne dieſe Vorrichtung nicht die ausgedehnte Anwendung gefunden haben würde, die er tatſächlich gefunden hat.

§ 62. Papin war 1680 Mitglied der Royal Society geworden, aber bereits im folgenden Jahre verließ er London, um ſich in Venedig niederzulaſſen, wo eine Akademie nach dem Vorbild der Royal Society gegründet werden ſollte. Im Jahre 1684 kehrte er wieder nach London zurück. Während ſeines zweiten Anſenthalts in London führte er als Curator of Experiments der Royal Society zahlreiche Verſuche aus. Auch entwarf er während dieſer Zeit einen Plan, den Luftdruck als Triebkraft zu benutzen.

Fig. 61.



Papinſcher Topf.

Er will aus einem langen Zylinder durch Waſſerkraft die Luft auspumpen und dann ſoll der Luftdruck den Kolben mit großer Kraft in den luftleeren Zylinder hineintreiben. Er legte den Plan der Royal Society vor. Dieſe war jedoch der Anſicht, daß es zweckmäßiger ſei, die Waſſerkraft direkt wirken zu laſſen anſtatt durch die komplizierte Maſchinerie mit der Luftpumpe, dem Kolben u. ſ. w. Papin, der erwartet hatte, daß ſein Projekt Lob und Anerkennung finden werde, empfand die ablehnende Haltung der Royal Society als eine Kränkung. Ende 1687 ſiedelte er, einem Rufe des Landgrafen von Heſſen folgend, als Profeſſor der Mathematik nach Marburg über.

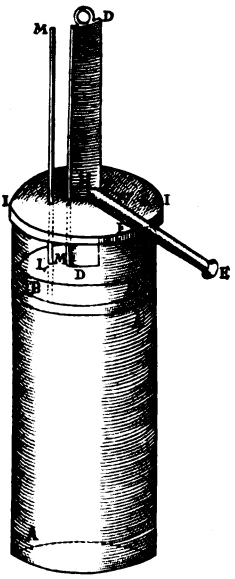
Hier nahm er ſeine Pläne über die Luftdruckmaſchine von neuem in Angriff. Was er ſuchte, war die Herſtellung eines leeren Raumes unter dem Kolben in einem Zylinder. Huygens hatte vorgeſchlagen, Schießpulver unter dem Kolben explodieren zu laſſen, während ſich dieſer nahe am Boden des Zylinders befand. Der Kolben wurde durch die Exploſion in die Höhe getrieben, und da die Pulvergaſe zum Teil entweichen konnten, wurde unter

Digitized by Google

dem Kolben ein luftverdünnter Raum erzeugt, so daß der Luftdruck auf den Kolben wirken konnte. Die Pulvermaschine konnte jedoch keine praktische Bedeutung erlangen. Vor jedem einzelnen Kolbenschlag mußte eine neue Ladung Pulver in den Zylinder eingeführt werden, und die Luftverdünnung unter dem Kolben war eine sehr unvollkommene.

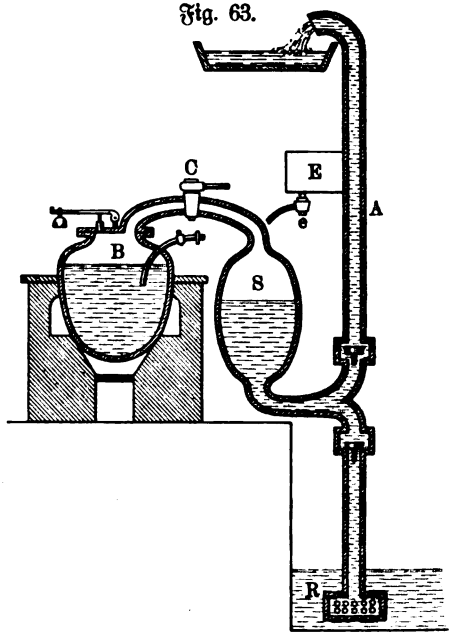
Papin ersetzte die Kraft des Pulvers durch Dampfdruck. Die Einrichtung seines Apparates ist aus Fig. 62 ersichtlich. *A* ist ein eiserner Zylinder, in welchem sich der Kolben *B* luftdicht bewegt. Der Kolben, welcher eine Durchbohrung *L* hat, wird mit der Stange bis fast auf den Boden des Zylinders niedergedrückt. Der kleine Zwischenraum zwischen dem Kolben und

Fig. 62.



Papins Dampfmaschine.

Fig. 63.



Saverys Wasserpumpe.

dem Boden des Zylinders wird durch die Öffnung *L* mit Wasser gefüllt und diese wird durch die Stange *M* verschlossen. Nun wurde der Zylinder auf Feuer gesetzt. Das Wasser verwandelte sich in Dampf und dieser trieb den Kolben in die Höhe. Wenn der Kolben in der höchsten Stellung angekommen war, wurde er durch den Sperrhaken *C* festgehalten, indem dieser durch die Feder *G* in einen Einschnitt der Kolbenstange *D* hineingedrückt wurde. Wenn der Sperrhaken einschlug, wurde das Feuer entfernt. Der Raum unter dem Kolben war jetzt mit Dampf gefüllt. Dann wurde der Zylinder durch Bespritzen mit kaltem Wasser abgekühlt. Sobald sich der Dampf verdichtet hat, ist der Druck im Innern des Zylinders aufgehoben und der Kolben wird durch den Luftdruck, also durch einen Druck von einem Kilogramm auf jedes

Digitized by Google

Quadratzentimeter, in den Zylinder hineingetrieben, sobald der Sperrhaken durch einen Schlag auf *C* entfernt wird. Papin dachte sich, die Kolbenstange sollte gezahnt sein und durch Eingreifen in ein Zahnrad eine Maschine in Gang setzen.

Allein diese Luftdruckmaschine (atmosphärische Maschine) war, wie man sich denken kann, in ihren Bewegungen äußerst langsam. Erst mußte das Wasser verdampfen, der Kolben in die Höhe gehen und der Sperrhaken einschlagen. Dann mußte das Feuer entfernt, der Zylinder abgekühlt und schließlich der Sperrhaken entfernt werden, damit der Kolben durch den Luftdruck hinabgedrückt wurde. Papin konstruierte ein Zentrifugalgebläse, mit dem er in kurzer Zeit ein lebhaftes Feuer unter dem Zylinder anfachen konnte. Hierdurch erreichte er es, daß die Maschine in jeder Minute eine Kolbenbewegung machte.

Eine anderer Fehler der Maschine war der, daß sie eine unverhältnismäßig große Menge Brennmaterial verbrauchte. Die Maschine hat daher keine praktische Verwendung gefunden. Sowohl der Landgraf von Hessen als auch die Royal Society lehnten es ab, die Angelegenheit weiter zu fördern, und Papin mußte seine Pläne für einige Zeit ruhen lassen.

§ 63. In England war inzwischen eine brauchbare Wasserhebemaschine von derselben Art wie die von Lord Somerset konstruiert worden, und zwar von Thomas Savery, einem Bergwerksingenieur in Cornwall. Er nahm 1698 ein Patent auf seine Maschine, die im folgenden Jahre in der Royal Society gezeigt wurde. *B* (Fig. 63) ist ein Dampfkessel, der durch das Rohr *C* mit dem Behälter *S* verbunden ist. Dieser steht wieder mit der Saug- und Druckpumpe *A* in Verbindung. Wenn die Maschine in Gang gesetzt wird, so ist der Hahn *C* geschlossen und der Behälter *S* sowie die beiden Pumpen sind mit Luft gefüllt. Sobald sich im Kessel eine hinreichende Menge Dampf gebildet hat, wird der Hahn *C* geöffnet. Der Dampf strömt in den Behälter *S* und bläst die Luft durch das Ventil der Druckpumpe aus. Sodann wird der Hahn *C* geschlossen und der Behälter *S* mit kaltem Wasser (aus *E*) übergossen. Indem sich der Dampf verdichtet, hört der Dampfdruck in *S* auf und das Druckventil wird durch den Luftdruck geschlossen, während das Wasser über das Saugventil steigt und in den Behälter *S* eintritt. Nun wird wieder der Hahn *C* geöffnet. Der Dampfdruck öffnet das obere und schließt das untere Ventil, und das Wasser steigt über das Druckventil. Dann wird der Hahn *C* wieder geschlossen, der Dampf in *S* verdichtet u. s. w. Die Maschine fand in Kohlenbergwerken als Wasserhebemaschine Anwendung.

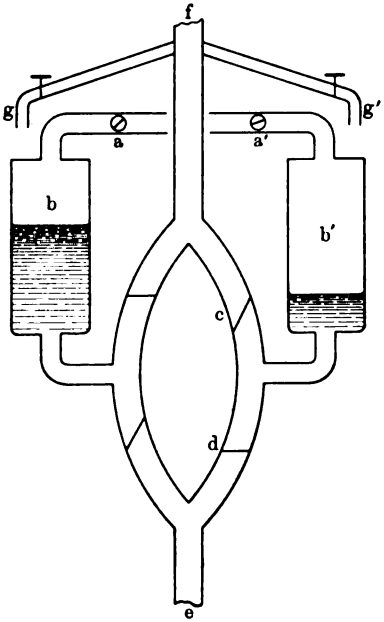
§ 64. Im Jahre 1702 veröffentlichte Savery ein Buch, in welchem er zwei wesentliche Verbesserungen seiner Maschine beschreibt. Die eine besteht darin, daß der Behälter *S* durch zwei Behälter *b* und *b'* (Fig. 64 a. f. S.) ersetzt ist, die einerseits mit dem Kessel und anderseits mit einer verzweigten Saug- und Druckpumpe *ef* in Verbindung stehen. Während der Dampf, der durch den Hahn *a'* eintritt, das Wasser des einen Behälters in das Rohr *f* hineindrückt, saugt der andere Behälter das Wasser durch das Rohr *e* in die

Digitized by Google

Höhe. Dann werden der Dampfhahn a' und der Kaltwasserhahn g geschlossen, dagegen der Dampfhahn a und der Kaltwasserhahn g' geöffnet. Jetzt wird das Wasser in b in das Rohr f gedrückt, während der Behälter b' das Wasser durch e in die Höhe saugt. Auf diese Weise wird die Leistungsfähigkeit der Maschine ungefähr verdoppelt.

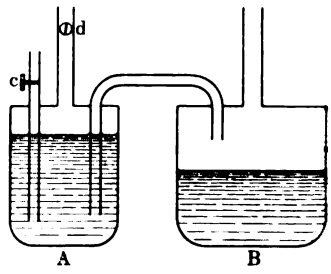
Die andere Verbesserung besteht in der Einführung eines Speisekessels. Da nämlich das Wasser im Kessel (Fig. 63) verbraucht wird, muß der Gang der Maschine von Zeit zu Zeit unterbrochen und der Kessel neu gefüllt werden. Savery verbindet nun den eigentlichen Maschinenkessel A in der aus Fig. 65

Fig. 64.



Saverys doppeltwirkende Dampfpumpe.

Fig. 65.



Saverys Speisekessel.

ersichtlichen Weise mit einem etwas kleineren Kessel B. Wird nun das Wasser in dem letzteren zum Sieden gebracht, so wird es durch den Dampfdruck in den Kessel A hinübergedrückt. So wird also dem Maschinenkessel Wasser, und zwar warmes Wasser zugeführt, ohne daß es nötig ist, den Gang der Maschine zu unterbrechen. — Das Verbindungsrohr der beiden Kessel muß mit einem Hahn versehen sein, der geschlossen wird, wenn durch c Wasser in den Speisekessel B eingeführt wird.

In dieser Gestalt fand die Maschine große Verbreitung. Sie verbrauchte allerdings viel Brennmaterial, da sich ein großer Teil des Wasserdampfes in Berührung mit dem kalten Wasser verdichtete. Aber die Maschine war ein ausgezeichnetes Pumpwerk, und der starke Verbrauch von Brennmaterial fiel in den Kohlenbergwerken nicht ins Gewicht.

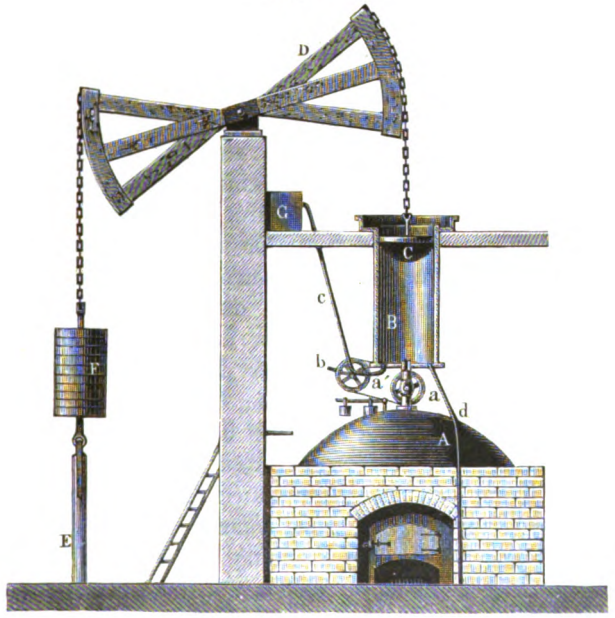
Thomas Savery behauptet, seine Maschine selbst erfunden zu haben. Er erzählt, er sei durch eine zufällige Beobachtung auf die Idee gebracht worden, die Verdichtung des Dampfes zum Heben von Wasser zu benutzen. Er habe eine Weinflasche, die noch einen Rest Wein enthalten habe, erwärmt

Digitized by Google

und, nachdem ſie ſich mit Dampf angefüllt habe, mit dem Hals in kaltes Waſſer eingetaucht. Aus der Beobachtung, daß das Waſſer in die Flaſche ſtieg, habe er den Schluß gezogen, daß ſich das Waſſer in den Kohlenbergwerken durch Waſſerdampf heben laſſen müſſe. Man hat Savery im Verdacht gehabt, die Idee aus Somerſets Schriften entlehnt zu haben. Für die Richtigkeit dieſer Annahme hat man jedoch keinen Beweis beibringen können. Jedenfalls war Savery der erſte, der eine brauchbare Waſſerhebemaſchine konſtruiert hat.

§ 65. Unabhängig von Savery und vielleicht gleichzeitig mit ihm waren der Eiſenhändler Newcomen und der Glaſermeiſter Cawley in

Fig. 66.



Newcomens atmoſphäriſche Dampfmaſchine.

Dartmouth damit beſchäftigt, ausfindig zu machen, wie der Waſſerdampf als Triebkraft benutzt werden könne. Sie fragten den damaligen Sekretär der Royal Society, Robert Hooke, um Rat. Dieſer riet ihnen ab, die Idee Papins zu verfolgen, fügte jedoch hinzu, wenn ſie ſchnell einen luftleeren Raum unter dem Kolben hervorbringen könnten, ſo hätten ſie die Aufgabe gelöſt. Man muß ſich darüber wundern, daß Hooke damals die Eigenſchaft des Dampfes, ſich ſozuſagen in einem Augenblicke zu verdichten, nicht beſſer kannte. Die beiden Handwerker ſetzten jedoch ihre Bemühungen fort und waren bald ſo weit, daß ſie ſich ihre Maſchine patentieren laſſen konnten. Da es ſich in dieſem Patent um die Herſtellung eines leeren Raumes durch

Digitized by Google

Dampf handelte, mußte Savery an dem Patent beteiligt werden. Im Jahre 1705 erhielten sie ein gemeinsames Patent auf die verbesserte Dampfmaschine, die in Fig. 66 (a. v. S.) abgebildet ist.

A ist ein eingemauerter Dampfkessel, der mit dem Zylinder *B* durch ein kurzes Rohr in Verbindung steht. Das Rohr kann durch den Hahn *a* geschlossen werden. Der Kolben ist durch eine Kette mit dem einen Ende des Balanciers *D* verbunden. Am anderen Ende hängt das Gegengewicht *F*, und an diesem die Pumpenstange *E*.

Ursprünglich war im Boden des Zylinders nur ein Hahn, und der Zylinder wurde von außen durch Aufspritzen von kaltem Wasser (aus dem Behälter *G*) abgekühlt. Die Maschine wirkte in folgender Weise. Wenn sich der Kolben in seiner tiefsten Stellung befand, wurde der Hahn *a* geöffnet. Das Gegengewicht *F* hob den Kolben und der Raum unterhalb desselben füllte sich mit Dampf. Wenn dann der Kolben in seiner höchsten Stellung ankam, wurde *a* geschlossen und der Kaltwasserhahn geöffnet. Der Zylinder wurde abgekühlt und der Dampf infolgedessen verdichtet. Dann wurde der Kolben durch den Luftdruck niedergedrückt und das Gegengewicht nebst der Pumpenstange gehoben. Jetzt wurde das Ventil *a* wieder geöffnet, der Dampf strömte in den Zylinder u. s. w. Das durch Verdichtung des Dampfes entstehende Wasser sammelte sich auf dem Boden des Zylinders an und wurde von Zeit zu Zeit durch Öffnen des erwähnten Hahns abgelassen.

§ 66. Diese Maschine beruht also auf demselben Prinzip wie die Papinsche. Die bewegende Kraft ist der Luftdruck, der Dampf dient nur dazu, den Raum unter dem Kolben luftleer zu machen. Diese Maschine hat aber vor der Papinschen den großen Vorzug, daß der Kessel und der Zylinder voneinander getrennt sind und daß der Kessel bei der Verdichtung des Dampfes nicht abgekühlt wird. Vor der Saveryschen Maschine hat sie den großen Vorzug, daß der Dampf nicht mit dem kalten Wasser, sondern nur mit dem Kolben und dem Zylinder in Berührung kommt.

§ 67. Erst sechs Jahre nach Erteilung des Patentes, im Jahre 1711, kam die erste derartige Maschine in Wolverhampton zur Verwendung. Einige Schwierigkeit machte die Herstellung des dampfdichten Ganges des Kolbens. Newcomen und Cawley suchten ihn dadurch zu erzielen, daß sie den Kolben mit einer Schicht Wasser bedeckten. Diese Art der „Dichtung" gab Veranlassung zu einer wichtigen Entdeckung. Eines Tages ging nämlich die Maschine schneller als gewöhnlich, und bei näherer Untersuchung stellte es sich heraus, daß Wasser in den Zylinder durchgesickert war, was eine augenblickliche Verdichtung des Dampfes zur Folge hatte, sobald der Dampfhahn geschlossen wurde. Dies gab Veranlassung, den Kaltwasserbehälter durch das Rohr *c* mit dem Zylinder zu verbinden und die Verdichtung des Dampfes anstatt durch äußere Abkühlung des Zylinders dadurch zu bewirken, daß man durch Öffnen des Hahnes *b* kaltes Wasser in den Zylinder eintreten ließ, wenn sich der Kolben in seiner höchsten Stellung befand. So bekam die Maschine nicht nur einen schnelleren Gang, sondern der Betrieb derselben

Digitized by Google

wurde auch billiger. Der Zylinder wurde jetzt bei weitem nicht so stark abgekühlt wie früher und es wurde infolgedessen viel weniger Dampf verbraucht, um den Zylinder zu erwärmen.

Das in den Zylinder eingespritzte Wasser mußte natürlich wieder aus demselben entfernt werden. Newcomen und Cawley lösten diese Aufgabe in einer sehr sinnreichen, wenn auch nicht immer leicht auszuführenden Weise. Sie führten nämlich vom Boden des Zylinders ein Rohr *d* in eine Zisterne hinab, in der das Wasser in einer Tiefe von mindestens 32 Fuß (10 m) stand. Durch dieses Rohr wurde das Kondensationswasser abgeleitet, und da das Rohr wie ein Wasserbarometer wirkt, weil der Zylinder luftleer ist, so steht das Wasser immer in derselben Höhe (vgl. I, § 234).

Die Dampfkessel der ersten Maschinen von Newcomen und Cawley waren nicht, wie in der Figur angegeben ist, mit einem Papinschen Sicherheitsventil versehen. Dasselbe kam aber vom Jahre 1718 an allgemein in Gebrauch.

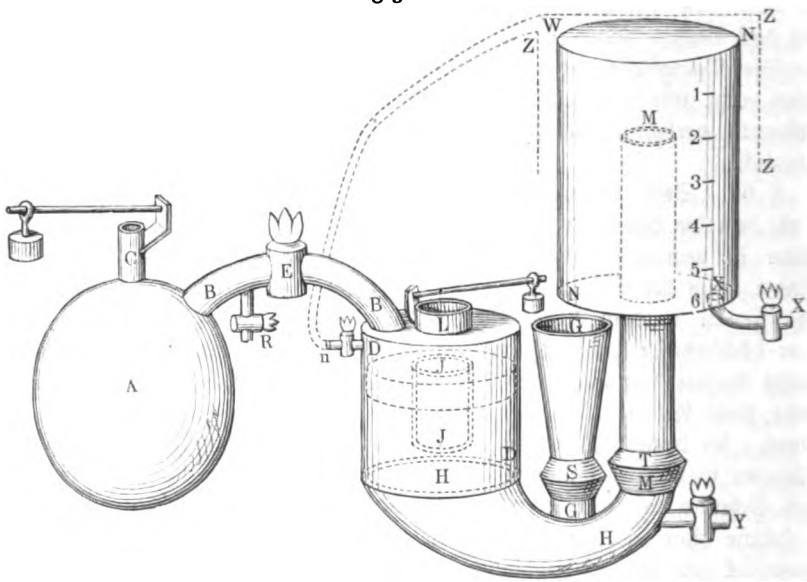
§ 68. Sehr wesentlich für den Gang einer atmosphärischen Maschine ist es, daß die Hähne im richtigen Augenblick geöffnet und geschlossen werden. Genau in dem Augenblick, wenn sich der Kolben in seiner tiefsten Stellung befindet, muß der Dampfhahn geöffnet werden. Ebenso muß der Kaltwasserhahn genau in dem Augenblick geöffnet werden, wenn sich der Kolben in seiner höchsten Stellung befindet. Das Stellen der Hähne erforderte die ungeteilte Aufmerksamkeit eines Arbeiters. Bei der Maschine in Wolverhampton wurde diese Arbeit von einem jungen Mann namens Humphrey Potter besorgt. Er bemerkte, daß die Hähne gedreht werden mußten, wenn sich der Balancier in einer bestimmten Stellung befand. Dadurch, daß er die Hähne durch Schnüre mit dem Balancier in Verbindung setzte, erreichte er es, daß die Hähne ohne sein Zutun durch die Bewegung des Balanciers im richtigen Augenblick geöffnet und geschlossen wurden. Später wurden die Schnüre durch eine solidere Steuerung ersetzt, die auf demselben Prinzip beruhte.

§ 69. So hatten Newcomen und Cawley den ursprünglichen Plan Papins verwirklicht. Sie hatten eine atmosphärische Maschine konstruiert, die mit einem Kolben versehen war und bei der eine schnelle Verdichtung des Dampfes stattfand. Papin hatte inzwischen eine Dampfmaschine konstruiert, in welcher nicht der Luftdruck, sondern der Dampfdruck als bewegende Kraft wirkte. Papin hatte im Jahre 1705 von Leibnitz eine Zeichnung von Saverys Maschine bekommen. Auch hatte er wahrscheinlich schon Beschreibungen derselben gelesen, die bereits 1705 in verschiedenen Zeitschriften veröffentlicht worden waren. Selbst spricht er jedoch nicht davon, daß er Saverys Maschine kannte, aber er veröffentlichte 1707 eine Schrift über eine „neue Methode, Wasser durch Feuer zu heben", in welcher sich Fig. 67 (a. f. S.) findet. *A* ist ein Dampfkessel mit Sicherheitsventil. Er steht durch ein Rohr mit dem Zylinder in Verbindung, der ebenfalls mit einem Sicherheitsventil versehen ist und in dem sich ein durchbohrter kupferner Kolben ohne Kolbenstange bewegt. *G* ist ein Trichter mit einem Ventil, welches sich

Digitized by Google

nach unten öffnet. Wenn Wasser in den Trichter gegossen wird, so tritt dieses in den Zylinder ein und treibt den Kolben in die Höhe, wenn der Hahn am oberen Ende des Zylinders geöffnet wird, so daß die Luft ausströmen kann. Wenn der Kolben oben angekommen ist, wird der Lufthahn geschlossen und der Dampfhahn im Verbindungsrohr zwischen dem Kessel und dem Zylinder geöffnet. Der Dampf strömt in den Zylinder, drückt den Kolben nach unten und treibt das Wasser in das Steigrohr *M*, in dem sich ein Ventil befindet, welches sich nach oben öffnet. Dann wird der Dampf

Fig. 67.



Papins Hochdruckmaschine.

abgesperrt, der Lufthahn geöffnet, von neuem Wasser in den Trichter gegossen, und der beschriebene Vorgang wiederholt sich. Papin benutzt also ebenso wie Savery den Dampfdruck zum Heben des Wassers, aber er läßt den Dampf nicht unmittelbar auf das Wasser wirken. Er wußte sehr wohl, daß das kalte Wasser große Mengen Dampf verdichtet, und dieses sollte durch den hohlen Kolben vermieden werden, der durch einen erwärmten eisernen Bolzen geführt wurde. Papin verdichtet auch nicht den verbrauchten Dampf, wie es Savery tat, sondern er läßt ihn durch den Lufthahn entweichen, wenn der Kolben zurückgeht. Den „Abdampf" wollte er dazu benutzen, das Wasser zu erwärmen, bevor es in den Trichter *G* gegossen wurde. Seine Maschine wirkte sehr kräftig, da sie mit großem Dampfdruck arbeitete. Ein Zerspringen der Maschine war nicht zu befürchten, da sowohl der Kessel als auch der Zylinder mit einem Sicherheitsventil versehen war.

Wie aus dem Titel der genannten Schrift hervorgeht, sollte die Maschine

Digitized by Google

hauptsächlich zum Heben des Wassers dienen. Papin ging jedoch auch mit dem Plane um, sie als Bewegungsmaschine zu benutzen. Er brachte daher über dem Steigrohr den Windkessel *WN* an, in welchem die Luft durch das hineingedrückte Wasser stark zusammengedrückt wurde. Wenn dann ein Hahn des Windkessels geöffnet wurde, so strömte das Wasser mit großer Kraft aus und konnte ein Schaufelrad in Bewegung setzen. Papin suchte die Maschine namentlich zum Bewegen von Schiffen zu benutzen. Bereits während seines ersten Aufenthalts in England hatte er auf der Themse ein Räderschiff gesehen, welches durch Pferdekraft in Bewegung gesetzt wurde und welches alle Ruderboote an Geschwindigkeit übertraf. Die Räder sollten jetzt mit Dampfkraft getrieben werden. Als Papin in Deutschland nicht die erwünschte Unterstützung fand, entschloß er sich (1707), wieder nach London überzusiedeln. Ein bereits in Kassel auf der Fulda fertiggestelltes Schiff wollte er mit nach England nehmen. Als er aber mit dem Schiff in Münden ankam, geriet er in Streit mit den dortigen Schiffern, die in dem Befahren der Fulda mit dem Dampfschiff einen Eingriff in ihre Rechte erblickten und das Schiff zerstörten. Auch in London machte er üble Erfahrungen. Er fand nicht die erhoffte Unterstützung seitens der Royal Society und geriet alsbald in dürftige Verhältnisse. Er hat, soviel man weiß, bis zu seinem Tode ein trauriges Dasein geführt. Er ist wahrscheinlich im Jahre 1712 in London gestorben.

§ 70. In der Geschichte der Dampfmaschine muß Papin als derjenige genannt werden, der den ersten wichtigen Schritt getan hat, die Dampfmaschine zu einer allgemeinen Kraftmaschine (Motor) zu entwickeln, wenn auch seine Hochdruckmaschine eine geringere Leistungsfähigkeit besaß als die atmosphärische Maschine von Newcomen und Cawley. Diese hatten die Idee von Papins erstem Projekt entlehnt, in welchem der Kolben den wesentlichsten Teil der Maschine bildete. Auch in seiner Hochdruckmaschine läßt Papin den Dampfdruck als treibende Kraft auf den Kolben wirken. Hiermit ist die Einrichtung der Dampfmaschine in großen Zügen skizziert. Wenn Papin auch die vielen Schwierigkeiten, die sich bei der Ausführung des Projektes boten, nicht zu überwinden vermochte, so ist er doch der erste gewesen, der erkannte, daß der Gebrauch des Kolbens und die Anwendung des Dampfdruckes zusammen die Grundlage für die Konstruktion der Dampfmaschine bilden müssen.

Papins Hochdruckmaschine verbrauchte zu viel Dampf. Die Idee des hohlen Kolbens, der von dem eisernen Bolzen warm gehalten wurde, war offenbar unpraktisch, denn die Maschine mußte jedesmal angehalten werden, wenn ein frisch erwärmter Bolzen in den Zylinder geschoben werden sollte. Außerdem war die Wirkung des erwärmten Kolbens nur gering. Das Wasser drang bei jeder Kolbenbewegung in den Zylinder und kühlte diesen ab, so daß er durch den einströmenden Dampf immer wieder erwärmt werden mußte.

Übrigens hatte auch die atmosphärische Maschine von Newcomen und Cawley ihre großen Mängel. Man lernte zwar den Kolben durch Leder

Digitized by Google

und Talg zu dichten, so daß das Wasser nicht über den Kolben treten und den Zylinder abkühlen konnte, allein die Verdichtung des Dampfes unterhalb des Kolbens durch Einspritzen von Wasser hatte einen großen Dampfverlust zur Folge. Der Hauptfehler war aber, daß die atmosphärische Maschine den Dampfdruck nicht ausnutzte. Der Zylinder mußte weit sein, wenn die Maschine kräftig wirken sollte. Aber je weiter der Zylinder ist, desto größer ist der Dampfverbrauch. Die Maschine fand fast nur in Kohlenbergwerken als Wasserhebemaschine Anwendung. Erst nachdem die Eigenschaften des Dampfes genauer erforscht waren, konnte die Dampfmaschine die große Bedeutung für die gesamte Kulturentwickelung gewinnen, die in der Vergangenheit nicht ihresgleichen hat.

§ 71. Die Völker des Altertums machten, wie bereits erwähnt, keinen Unterschied zwischen Luft und Dampf. Ebensowenig wußten sie, daß es verschiedene Luftarten gibt. Aber sowohl Heron und Vitruvius, als auch Salomon de Caus haben bei ihrer Beschäftigung mit dem Wasserdampf ohne Zweifel erkannt, daß dieser in mehrfacher Hinsicht von der gewöhnlichen Luft verschieden ist. Ein bestimmter Unterschied zwischen Luft und Dampf wurde jedoch erst am Anfang des 17. Jahrhunderts durch Johann Baptist van Helmont gemacht. Er führte das Wort „Gas" ein und bezeichnete mit demselben einen luftförmigen Körper, der sich beim Abkühlen nicht zu einer Flüssigkeit verdichtet. Ein Dampf dagegen, sagt er, ist ein luftförmiger Körper, der nur in der Wärme bestehen kann und der sich beim Abkühlen verdichtet.

Hundert Jahre später versuchte Halley eine Erklärung der Natur des Wasserdampfes zu geben. Er meinte, der Dampf bestehe aus kleinen hohlen Wasserbläschen, die mit verdünnter Luft gefüllt sind. Der Dampf ist daher leichter als die gewöhnliche Luft und steigt in dieser in die Höhe. Ein Zeitgenosse von Halley, der Physiker Derhem, behauptete sogar, er habe die Bläschen in einem guten Vergrößerungsglase gesehen. Der früher erwähnte Professor Wolf (§ 23) suchte zu ermitteln, wie stark die Luft in den Bläschen verdünnt sei, und Christian Gottlieb Kratzenstein (1723 bis 1795) berechnete, daß die Bläschen einen Durchmesser von $^1/_{50000}$ Zoll haben. Noch heutzutage findet man in manchen Lehrbüchern die Angabe, daß die verdichteten Wasserteilchen in den Wolken solche mit Luft gefüllte Bläschen seien. Derartige Wasserbläschen können aber unmöglich bestehen. In der stark gekrümmten Oberfläche derselben würde eine so starke Spannung herrschen, daß sie augenblicklich zusammengedrückt werden würden.

§ 72. Die wissenschaftliche Akademie in Bordeaux setzte 1743 einen Preis für Beantwortung der Frage aus, weshalb der Wasserdampf in die Höhe steigt, und es wurde auch zweien von den eingelaufenen Abhandlungen ein Preis zuerkannt, obwohl sie die Erscheinung in verschiedener Weise erklärten. Der Verfasser der einen, der bereits erwähnte Kratzenstein, hielt an der Bläschentheorie fest; der Verfasser der anderen dagegen, Georg E. Hamberger, gab eine ganz neue Erklärung. Er verglich die Dampf-

Digitized by Google

bildung in der Luft mit der Auflösung fester Körper im Wasser. Ebenso wie sich Salz in Berührung mit Wasser in diesem auflöst, so löst sich auch das Wasser in Berührung mit der Luft in dieser. Charles le Roy (1726 bis 1779) führte diese Lösungstheorie weiter aus und machte darauf aufmerksam, daß die Luft nur eine begrenzte Menge Wasser aufnehmen kann, ganz ebenso wie Wasser nur eine begrenzte Menge Salz lösen kann. Und da man eine Salzlösung, die nichts mehr aufnehmen kann, gesättigt nennt, so bezeichnete er auch die Luft, die kein Wasser mehr aufnehmen kann, als mit Wasserdampf gesättigt.

Setzt man zu einer gesättigten Salzlösung noch Salz hinzu, so löst sich dieses nicht auf, sondern sinkt auf den Boden des Gefäßes hinab. Die entsprechende Erscheinung bei gesättigter Luft besteht darin, daß, wenn noch mehr Dampf zugeführt wird, dieser sich in Tropfen ausscheidet. Warmes Wasser löst mehr Salz auf als kaltes Wasser, und le Roy fand sofort den entsprechenden Satz: Warme Luft löst mehr Wasser auf (kann mehr Dampf enthalten) als kalte Luft. Wenn daher die Temperatur der Luft sinkt, so scheidet sich nicht selten ein Teil des Wasserdampfes als Tau aus.

Wenn die Luft mit Dampf gesättigt ist, so ist dieser Dampf selbst sogenannter gesättigter Dampf, d. h. bei der geringsten Temperaturerniedrigung verdichtet sich ein Teil des Dampfes zu Wasser. Wenn dagegen gesättigter Dampf erwärmt wird, so verwandelt er sich in sogenannten ungesättigten oder überhitzten Dampf, denn nun kann er abgekühlt werden, ohne daß er sich sofort teilweise zu Wasser verdichtet. Zunächst verwandelt sich der ungesättigte Dampf in gesättigten, und erst bei weiterer Abkühlung des letzteren findet Verdichtung zu Wasser statt. Die freie Luft enthält immer Wasserdampf, aber in sehr wechselnden Mengen, und in der Regel ist er ungesättigt. Wenn sich aber die Luft hinreichend abkühlt, so wird Wasserdampf ausgeschieden, d. h. es entstehen Tau, Nebel und Wolken.

§ 73. Hambergers Lösungstheorie fand viele Anhänger. Sie war sehr einfach und veranschaulichte sehr gut den Unterschied zwischen gesättigtem und ungesättigtem Dampf. Auch war es nach dieser Theorie sehr leicht zu verstehen, weshalb das Wasser viel schneller verdampft, wenn ein Luftstrom über es hinstreicht, als wenn die Luft über der Oberfläche in Ruhe ist. Im letzteren Falle ist nämlich die Luft unmittelbar über der Oberfläche alsbald mit Dampf gesättigt und die Verdunstung hört infolgedessen auf. Im ersteren Falle dagegen kommt die Oberfläche des Wassers fortwährend mit frischer Luft in Berührung, die noch nicht gesättigt ist und daher noch mehr Wasserdampf aufnehmen kann, als sie bereits enthält.

Eine große Schwierigkeit entstand für diese Theorie, als Wallerius Ericson (1709 bis 1785), Professor der Chemie an der Universität in Upsala, darauf aufmerksam machte, daß das Wasser im luftleeren Raum nicht nur ebenso leicht, sondern sogar noch schneller verdampft als in der Luft. Hier konnte also keine Rede davon sein, daß sich das Wasser in der Luft löst. Es entstand über diese Sache ein langwieriger Streit, der erst

Digitized by Google

durch die Unterſuchungen Daltons über den Dampfdruck (§ 81) ſeinen Abſchluß fand.

§ 74. Papin hat merkwürdigerweiſe, wie es ſcheint, das Sieden nicht näher unterſucht, obgleich es ihm bekannt war, daß der Siedepunkt von dem Druck abhängt, der auf der Oberfläche des Waſſers ruht. Papin wußte ſelbſtverſtändlich, daß ſich die Temperatur des Waſſers während des Siedens nicht ändert, allein er ſchenkte dieſer Erſcheinung keine beſondere Beachtung.

Joſeph Black war der erſte, der dieſe Sache genauer unterſuchte. Wenn das Waſſer erwärmt wird, ſo entweicht zunächſt die in dem Waſſer enthaltene Luft. Sie ſteigt in Geſtalt feiner Luftperlen durch das Waſſer in die Höhe

Fig. 68.

Luftblaſen im Waſſer.

Fig. 69.

Sieden des Waſſers.

(Fig. 68). Nach einiger Zeit entſteht auf dem Boden des Gefäßes Dampf. Die erſten Dampfblaſen kommen aber nicht bis an die Oberfläche des Waſſers, ſondern ſie werden unterwegs zuſammengedrückt (Fig. 69), da die ganze Waſſermaſſe noch nicht hinreichend erwärmt iſt. Infolgedeſſen kommen das Waſſer und die Flaſche in eine zitternde Bewegung, die als ein ſingender Ton wahrgenommen wird. Das Waſſer „ſingt". Dies findet unmittelbar vor dem Eintreten des Siedens ſtatt. Wenn nämlich das „Singen" aufhört, ſo iſt das Waſſer ſo warm, daß die Dampfblaſen nicht unterwegs verdichtet werden, ſondern bis an die Oberfläche des Waſſers emporſteigen. Während des Siedens ſteigt die Temperatur nicht, trotzdem das Feuer fortwährend Wärme an das Waſſer abgibt. Man ſuchte dies dadurch zu erklären, daß man annahm, der Dampf entſtehe nur auf dem Boden des Gefäßes und das übrige Waſſer erreiche erſt die zur Dampfbildung erforderliche Temperatur, wenn es mit dem Boden in Berührung kommt. Würde die ganze Waſſer-

Digitized by Google

masse gleichzeitig bis zum Siedepunkte erhitzt, so würde die geringste Wärmezufuhr hinreichen, um die ganze Wassermasse in einem Augenblicke in Dampf zu verwandeln.

Black erkannte, daß die Erscheinung des Siedens durch diese Theorie nicht vollständig erklärt wird. Er schreibt: „Ich kann leicht zeigen, daß die Dampfbildung eine große Menge Wärme erfordert, auch wenn das Wasser bereits auf eine solche Temperatur erwärmt ist, daß die geringste Erhöhung derselben die Verwandlung von Wasser in Dampf bewirkt. Wäre dies nicht so, so würde die ganze Wassermasse explodieren, d. h. sie würde sich in einem Augenblicke in Dampf verwandeln, und zwar mit einer Kraft, die der Kraft des Schießpulvers vergleichbar sein würde. Aber ich kann zeigen, daß die erforderliche große Wärmemenge in den Dampf eintritt, während dieser sich bildet, ohne daß er so stark erwärmt wird, daß es vermittelst des Thermometers wahrgenommen werden kann.

Wenn ein Kessel mit Wasser auf das Feuer gesetzt wird, so geht vom ersten Augenblicke an bis zum Beginne des Siedens die Wärme schnell durch den Kessel in das Wasser über.

Wir beobachten vielleicht, daß das Wasser in fünf Minuten um 20° F erwärmt wird. Nun hat man beobachtet, daß der Übergang der Wärme von einem Körper zu einem anderen im Verhältnis der Temperaturverschiedenheit erfolgt, wenn die übrigen Umstände unverändert bleiben. Wir können daher in diesem Falle, da die Temperatur des Wassers während des Siedens (im Verhältnis zur Temperatur des Feuers) nicht merklich steigt, annehmen, daß die Wärme während des Siedens ungefähr in derselben Menge in das Wasser übergeht wie vor dem Sieden. Diese Annahme ist durchaus berechtigt, denn ich habe oft beobachtet, daß zur Erwärmung des Wassers um 162° F 40 Minuten erforderlich waren, wenn es sich in den letzten fünf Minuten vor dem Sieden um 20° F erwärmte.

Wäre nun die gewöhnliche Ansicht (über das Sieden) richtig, so müßte sich die ganze Wassermasse in einigen Minuten in Dampf verwandeln. Es würde eine riesige Ausdehnung stattfinden, die stark genug sein würde, das Haus in die Luft zu sprengen.

Ich kann mich nicht anders erinnern, als daß ich immer eine unklare Vorstellung davon gehabt habe, daß die gewöhnliche Auffassung des Verdampfungsvorganges mit den Tatsachen unvereinbar ist, und ich glaube, daß es vielen anderen ebenso gegangen ist, wenn sie das Sieden des Wassers beobachtet haben. Diese Vorstellung wirkte aber auf mich nicht mit hinreichender Stärke, bevor ich meinen Versuch über das Schmelzen des Eises gemacht hatte." (§ 48.)

Black war sich klar darüber, daß der Wärmeverbrauch beim Verdampfen viel schwieriger zu bestimmen ist, als der Wärmeverbrauch beim Schmelzen. Er glaubte, die Methode der Zeitbeobachtung werde kein brauchbares Resultat liefern. Als ihm jedoch ein Branntweinbrenner mitteilte, er wisse genau,

Digitized by Google

wieviel Flüssigkeit sein Apparat in einer Stunde liefern müsse, wenn er in Ordnung sei, suchte er doch das Problem in dieser Weise zu lösen.

§ 75. Er überzeugte sich zunächst, daß, wenn Wasser zum Sieden gebracht und auf ein gleichförmiges Feuer gestellt wird, in gleichen Zeiten gleich viel Dampf erzeugt wird. Dann ermittelte er die Zeit, die eine gewisse Wassermenge brauchte, um über einer gleichförmigen Flamme ins Sieden zu kommen, und die Zeit, die verging, bis das Wasser über derselben Flamme vollkommen verdampft war.

Beispiel. Ein Pfund Wasser von 10° C braucht eine Viertelstunde, um ins Sieden zu kommen, und sechs Viertelstunden, vom Beginn des Siedens an gerechnet, um vollständig zu verdampfen. Um das Wasser bis zum Siedepunkt zu erwärmen, sind 90 Wärmeeinheiten erforderlich. Es gehen also in einer Viertelstunde 90 Wärmeeinheiten von der Flamme in das Wasser über. In den sechs Viertelstunden, die das Sieden gedauert hat, sind dem Wasser $90 . 6 = 540$ Wärmeeinheiten zugeführt worden. Diese sind ausschließlich zum Verdampfen eines Pfundes Wasser verbraucht worden.

Black selbst fand nicht 540, sondern eine bedeutend niedrigere Zahl. Daß die Wärme aber wirklich zur Dampfbildung verbraucht wird, zeigte Black durch einen einfachen, aber sinnreichen Versuch. Er erhitzte Wasser in einem geschlossenen Gefäße (Papinscher Topf) bedeutend über 100° C, nahm dann das Gefäß vom Feuer hinweg und ließ den Dampf entweichen. Da das Wasser jetzt eine Temperatur von über 100° C hatte, so hätte nach der früheren Auffassung des Siedevorganges die ganze Wassermasse vollständig in Dampf übergehen müssen, sobald dieser den nötigen Platz gefunden hätte. Dies geschah aber nicht. Dagegen hatte das Ausströmen des Dampfes zur Folge, daß die Temperatur des Wassers auf 100° C sank. Es bildete sich nur soviel Dampf, als der Wärmemenge entsprach, die das Wasser bei der Erwärmung über 100° hinaus aufgenommen hatte. Dieser schöne Versuch bildet ein Seitenstück zu Blacks Versuch mit Fahrenheits Gefrierthermometer (§ 49).

James Watt, der mit Black befreundet war, führte den beschriebenen Versuch in folgender Weise aus:

In einem offenen Papinschen Topf brachte er Wasser zum Sieden, und zwar so, daß infolge der Verdampfung die Oberfläche des Wassers in einer halben Stunde um einen Zoll sank. Dann unterbrach er das Sieden, setzte so viel Wasser zu, als verdampft war, und brachte den Topf von neuem auf die Flamme, die gleichmäßig mit derselben Stärke brannte. Jetzt schloß er aber den Dampfhahn in dem Augenblicke, als das Sieden anfing, und ließ wieder eine halbe Stunde vergehen. Als er dann den Dampfhahn öffnete, strömte der Dampf im Laufe von zwei Minuten aus und die Oberfläche des Wassers sank wieder um einen Zoll.

Also konnte die Wärme, die das Wasser in einer halben Stunde aufnahm, je nach Umständen entweder langsam im Laufe einer halben Stunde oder schnell im Laufe von zwei Minuten dieselbe Wassermenge verdampfen.

Digitized by Google

Zur Verdampfung einer bestimmten Menge Wasser (von 100° C) ist immer dieselbe Wärmemenge erforderlich.

§ 76. Der von Black geführte Beweis, daß durch die Verdampfung Wärme verbraucht, also Kälte erzeugt wird, wurde durch verschiedene ältere Beobachtungen bestätigt. So hatte Boyle beobachtet, daß lauwarmes Wasser, welches unter der Glocke der Luftpumpe zum Sieden, also zum schnellen Verdampfen gebracht wird, sich schnell abkühlt. Blacks Lehrer, Professor Cullen (§ 47), der verschiedene Wärmeversuche machte, hatte darauf hingewiesen, daß eine Flüssigkeit, welche leicht verdampft, immer kälter als die Umgebung ist. Er beobachtete z. B., daß Äther unter der Glocke der Luftpumpe so schnell verdampft, daß die Temperatur unter den Gefrierpunkt des Wassers sinkt. Auch ohne Anwendung der Luftpumpe läßt sich Wasser durch Verdampfen von Äther zum Gefrieren bringen. Man bringt etwas Wasser in ein dünnwandiges Reagierglas und stellt dieses in ein Glas, welches Äther enthält (Fig. 70). Den Äther bringt man durch Einblasen von Luft zum schnellen Verdampfen. Jede Luftblase füllt sich mit Ätherdampf und bewirkt daher eine Abkühlung des Äthers, weil zur Verdampfung Wärme verbraucht wird, die in diesem Falle dem Äther selbst entzogen wird. In kurzer Zeit hat sich der Äther, und infolgedessen auch das Wasser, so stark abgekühlt, daß das letztere gefriert.

Fig. 70.

Erzeugung von Kälte durch Verdampfen von Äther.

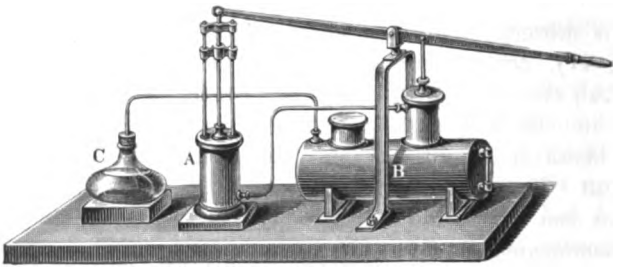
Wasser kann auch durch die eigene Verdunstung zum Gefrieren gebracht werden, wenn man nur dafür sorgt, den Luftdruck und den Dampfdruck von der Oberfläche des Wassers zu entfernen. Hierauf beruht die von dem französischen Ingenieur E. Carré konstruierte Eismaschine.

Die Wasserflasche *C* (Fig. 71 a. f. S.) steht durch ein gebogenes Rohr mit dem Bleizylinder *B* in Verbindung, welcher starke Schwefelsäure enthält, die den Wasserdampf begierig absorbiert. Der Bleizylinder steht außerdem durch ein Rohr mit der Luftpumpe *A* in Verbindung. Wenn die Pumpe in Bewegung gesetzt wird, wird der Luftdruck in dem Schwefelsäurebehälter und in der Flasche vermindert und es findet infolgedessen eine starke Ver-

Digitized by Google

dampfung und Abkühlung des Wassers statt. Die Absorption des Wasserdampfes durch die Schwefelsäure wird dadurch beschleunigt, daß durch den Hebel der Luftpumpe eine Vorrichtung in Bewegung gesetzt wird, durch welche die Säure fortwährend umgerührt wird.

Fig. 71.



Carrésche Eismaschine.

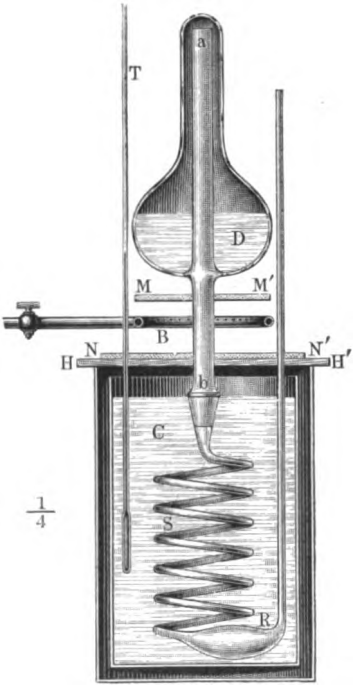
§ 77. Black hat auch gezeigt, daß der Dampf wirklich die große Verdampfungswärme enthält, und daß diese wieder zum Vorschein kommt, wenn sich der Dampf zu Wasser verdichtet. Er wies darauf hin, wie leicht man sich an Dampf verbrennen kann. Ein kleiner Dampfstrahl aus einem Teekessel kann die Hand mit Brandblasen bedecken, selbst wenn der Dampf im verdichteten Zustande kaum einen viertel Tropfen ausmacht. Tausend Tropfen kochenden Wassers können nicht dieselbe Wirkung hervorbringen. Um die Verdichtungswärme zu bestimmen, verdampfte er ein Pfund Wasser und leitete den Dampf durch ein spiralförmig gewundenes Rohr, welches in kaltem Wasser stand. Der Dampf verdichtete sich und gab die Verdichtungswärme ab. Diese war aber ebenso groß wie die Verdampfungswärme. Der Dampf „bindet" also bei seiner Bildung Wärme und erzeugt bei der Verdichtung wieder dieselbe Wärmemenge.

Die Verdichtungswärme ist später von verschiedenen Physikern nach verschiedenen Methoden ermittelt worden. Ein von Berthelot zu diesem Zwecke konstruierter Apparat ist in Fig. 72 abgebildet. Das flaschenförmige Glasgefäß D ist oben geschlossen. In den Boden desselben ist ein an beiden Enden offenes Glasrohr eingeschmolzen. Das untere Ende desselben ist in die Spirale S eingeschliffen. An die Spirale schließt sich der Behälter R und an diesen ein nach oben gebogenes Glasrohr an. Die Spirale S und der Behälter R stehen in einem Kalorimeter (vergl. § 53), welches eine abgewogene Menge Wasser enthält, dessen Temperatur an dem Thermometer T abgelesen wird. Der Behälter D ist zum Teil mit Wasser gefüllt. Das Gewicht des Behälters, sowie das des Wassers, wird vor dem Versuch bestimmt und die Temperatur wird am Thermometer abgelesen. Dann wird D durch die Flamme des Brenners B, die von dem Drahtnetz MM' bedeckt wird, erwärmt. Das Wasser kommt ins Sieden und der Dampf tritt durch das Rohr ab in die Spirale S und wird hier verdichtet. Das Wasser sammelt

Digitized by Google

sich im Behälter R an. Wenn ein Teil des Wassers verdampft und wieder verdichtet worden ist, wird der Versuch abgebrochen und die Temperatur des Kalorimeterwassers abgelesen. Die Wärmemenge, welche bei der Verdichtung der Gewichtseinheit Wasser frei wird, ergibt sich dann durch eine einfache Rechnung.

Fig. 72.



Messung der Verdichtungswärme.

Beispiel. Das Kalorimeter enthält 200 g Wasser von 15° C. Es werden 2 g Wasser überdestilliert und das Thermometer steigt um 7,65° C. — Die 200 g Wasser im Kalorimeter haben also 1530 Wärmeeinheiten aufgenommen, die durch die Verdichtung von 2,5 g Dampf und Abkühlung des entstandenen Wassers von 100° auf 22,65°, also um 77,35° C entstanden sind. Wenn sich 2,5 g Wasser um 77,35° abkühlen, werden 193,375 Wärmeeinheiten abgegeben. Also ist die Verdichtungswärme von 2,5 g Dampf gleich 1530 — 193,375 = 1336,625 Wärmeeinheiten. Folglich ist die Verdichtungswärme von 1 g Dampf 534,65. In Wirklichkeit ist die Verdichtungswärme oder die „gebundene" (latente) Wärme des Wasserdampfes etwas größer, nämlich 536. Diese Zahl gilt jedoch nur, wenn die Verdampfung bei 100° stattfindet. Bei niedrigeren Temperaturen ist die Verdampfungswärme größer (bei 0° z. B. 606) und bei höheren Temperaturen kleiner (bei 200° z. B. 464).

Auf der großen gebundenen Wärme des Wasserdampfes beruht das Kochen und Heizen mit Dampf. Eine verhältnismäßig kleine Dampfmenge enthält nämlich eine große Anzahl von Wärmeeinheiten, und in einem kleinen Dampfkessel, in dem nur ein geringer Druck zu herrschen braucht, können große Mengen Wasser verdampft werden. Zur Erwärmung von 536 Liter Wasser um 1° ist nur 1 kg Dampf erforderlich.

§ 78. Boyles Untersuchungen über die „gebundene" Wärme erregten in hohem Grade das Interesse von James Watt, der, unabhängig von Boyle, gefunden hatte, daß das Wasser zum Verdampfen eine große Menge Wärme erfordert.

James Watt war 1736 in Greenock, der Hafenstadt Glasgows, geboren. Sein Vater war ein angesehener Bürger der Stadt. Er war Schiffsbaumeister, etwas Instrumentenmacher und zugleich Kaufmann. Er lebte eine zeitlang in guten Verhältnissen, verlor aber später sein Vermögen infolge mißglückter Spekulationen. James hatte noch zwei jüngere Geschwister, einen Bruder und eine Schwester, die aber beide in jugendlichem Alter starben. Er war

Digitized by Google

ein schwächliches Kind und er entwickelte sich, wie es bei begabten kränklichen Kindern nicht selten geht, geistig schneller als körperlich. Er war viel darauf angewiesen, sich selbst zu unterhalten, und da er ein geweckter und wißbegieriger Knabe war, lernte er früh mit Verständnis lesen, der Unterhaltung der Erwachsenen zuzuhören und namentlich auch die große Kunst, zu fragen. Es gab immer etwas, was seine Aufmerksamkeit erregte. Namentlich waren es mechanische Dinge, für die er schon als kleiner Knabe großes Interesse zeigte. Wenn er von Maschinen las, so suchte er sie selbst zu konstruieren, was ihm auch nicht selten gelang. Er las vorzugsweise Naturbeschreibungen und Naturgeschichte. Sehr früh war sein Sinn für Naturschönheiten entwickelt und seine freie Zeit benutzte er zu Ausflügen in die Umgegend. Er wollte selbst sehen, was er in den Büchern gelesen hatte, und er konnte seine Eindrücke mit einer Lebhaftigkeit schildern, daß alle, die ihm zuhörten, etwas von der Freude empfanden, die er selbst bei seinen Erlebnissen empfunden hatte.

Fig. 73.

James Watt.

Da er keinen regelrechten Unterricht erhielt, sondern sich selbst überlassen war, beschäftigte er sich mit den verschiedenartigsten Dingen, Botanik, Mineralogie und Geologie, Medizin, Chemie, Physik, Geschichte und Poesie. Aber überall suchte er gründlich zu Werke zu gehen und stellte eingehende Untersuchungen an, soweit es seine Hilfsmittel gestatteten. Als er z. B. eine Beschreibung des menschlichen Schädels las, verschaffte er sich einen solchen, um den Bau desselben aus eigener Anschauung kennen zu lernen.

Als er 18 Jahre alt war, entschloß er sich, Mechaniker zu werden. Er kam 1754 zu einem Mechaniker und Optiker in Glasgow in die Lehre. Es gab aber hier nicht viel für ihn zu lernen, denn seine Arbeit bestand meist im Reparieren von Brillen u. dergl. Er blieb nur ein Jahr in Glasgow und ging dann nach London. Hier wurde es ihm schwer, in einer Werkstatt anzukommen. Die Zunftbestimmungen verlangten nämlich eine Lehrzeit von sieben Jahren, eine Bedingung, auf die er nicht eingehen wollte, da er wußte, daß er die Kunst in viel kürzerer Zeit lernen würde. Schließlich fand er Aufnahme in der Werkstatt von Morgans, in der er ein Jahr lang arbeitete. Im Laufe dieses Jahres bildete er sich zu einem tüchtigen und einsichtsvollen Mechaniker aus, wurde mit den feinsten Arbeiten vertraut und lernte die meisten physikalischen Meßinstrumente kennen.

Nach Ablauf des Jahres wollte er sich nach einem kurzen Aufenthalte

Digitized by Google

in Greenock in Glasgow als Mechaniker niederlassen. Aber wieder kamen ihm die Zunftbestimmungen in den Weg. Er hatte keinen Lehrbrief und durfte deshalb keine eigene Werkstatt haben. Trotzdem kam er in den Besitz einer eigenen Werkstatt, indem er von der Universität zum Konservator der Sammlungen und zum Universitätsmechaniker ernannt wurde.

§ 79. Sowohl die Professoren als auch die Studierenden merkten bald, daß der Mechaniker nicht nur geschickt in seinem Fache war, sondern daß er auch in verschiedenen anderen Gebieten bedeutende Kenntnisse besaß. Bewunderung erregte die Energie, mit der er die Lösung eines Problems, das er in Angriff genommen hatte, verfolgte. Er ruhte nicht eher, als bis er die Lösung gefunden hatte, wenn sie auch viel Arbeit erforderte und selbst wenn er fremde Sprachen lernen mußte, um sich mit der Literatur über den fraglichen Gegenstand bekannt machen zu können.

Eine seiner ersten selbständigen physikalischen Arbeiten war eine Untersuchung über den Dampfdruck bei verschiedenen Temperaturen. Veranlaßt wurde er dazu durch Betrachtungen über das Verhalten des Wasserdampfes in dem Modell einer Newcomenschen Maschine, das sich in der Universitätssammlung befand. Er erkannte bei dieser Gelegenheit, daß die Dampfbildung mit einem Verbrauch von Wärme verbunden ist. Doch diese Verhältnisse hatte bereits Boyle in meisterhafter Weise aufgeklärt. Dagegen wußte man über den Zusammenhang zwischen Dampfdruck und Temperatur fast gar nichts. Es war weiter nichts bekannt, als daß der Dampfdruck mit steigender Temperatur zunimmt. Watt benutzte bei seinen Untersuchungen zwei verschiedene Methoden, je nachdem die Temperatur des Dampfes über oder unter 100° lag. Bei Temperaturen über 100° maß er den Dampfdruck mit Hilfe eines Papinschen Topfes. Die Temperatur wurde in der früher beschriebenen Weise (§ 61) gemessen und der Druck aus der Belastung des Sicherheitsventils berechnet.

Für Temperaturen unter 100° maß er den Dampfdruck mit Hilfe eines Quecksilberbarometers. Er brachte etwas Wasser in die Torricellische Leere und hielt den entstehenden Dampf auf einer bestimmten Temperatur. Der Dampfdruck wurde direkt durch die Verkürzung der Quecksilbersäule gemessen.

Auf die Ergebnisse von Watts Messungen soll hier nicht näher eingegangen werden, obwohl sie viel genauer waren als die von J. H. Ziegler in Winterthur 1769 veröffentlichten Messungen. Wir wollen sogleich zu den Untersuchungen von John Dalton und Henri Victor Regnault übergehen.

§ 80. John Dalton, geb. 1766 in Eaglesfield in Cumberland, gehörte einer armen Quäkerfamilie an. Nachdem er die Schule seines Geburtsortes besucht und zuletzt als Hilfslehrer tätig gewesen war, kam er nach Kendal zu einem Vetter, der hier eine Fortbildungsschule leitete. Dalton war an dieser Schule als Lehrer tätig, fand aber zugleich Gelegenheit zu weiterer Ausbildung. Er interessierte sich namentlich für Mathematik und Physik. Im Jahre 1785 übernahm er selbst die Leitung der Schule. Um diese Zeit fing er an, selbständige mathematische Arbeiten zu veröffentlichen. Auch

Digitized by Google

machte er regelmäßig jeden Tag meteorologische Beobachtungen, was er bis an sein Lebensende fortsetzte. Im Jahre 1793 wurde er Lehrer der Mathematik an einem „College“ in Manchester. Als die Schule 1799 nach York verlegt wurde, gab Dalton seine Stellung auf und blieb in Manchester, wo er bis zu seinem Tode (1844) als Privatlehrer tätig gewesen ist. Zu seinen Schülern gehörte auch der später so berühmt gewordene J. P. Joule. — Dalton lebte in bescheidenen Verhältnissen, machte aber mit geringen Hilfsmitteln eine Reihe äußerst wichtiger Entdeckungen. Hierher gehören seine Untersuchungen über den Dampfdruck, über den Druck von Luftmischungen und vor allen Dingen seine chemischen Arbeiten, die ihn zur Aufstellung der Atomtheorie führten. Er wurde Mitglied der Royal Society, der Pariser Akademie und verschiedener anderer gelehrter Gesellschaften. In den letzten Jahren seines Lebens bezog er eine Staatspension.

Fig. 74.

John Dalton.

§ 81. Dalton führte seine Beobachtungen über den Dampfdruck bei Temperaturen unter 100° ebenso wie Watt mit Hilfe des Barometers aus. Er umgab die Barometerröhre mit einem weiteren Rohre, welches durch zwei Kockringe $A\,A$ (Fig. 75) an der Barometerröhre festgehalten wurde. Den Zwischenraum zwischen den beiden Röhren füllte er mit Wasser von bekannter Temperatur. Dann brachte er vermittelst einer Pipette etwas Wasser in die Barometerröhre. Der luftleere Raum über dem Quecksilber füllte sich mit Wasserdampf und das Quecksilber wurde durch die Spannung des Dampfes herabgedrückt. Dalton beobachtete nun, daß, wenn der Dampf gesättigt ist, das Rohr tiefer in das Gefäß C hinabgesenkt und dadurch der dampferfüllte Raum verkleinert werden kann, ohne daß der Dampfdruck größer wird. Dagegen verdichtet sich ein Teil des Dampfes zu Wasser. Gesättigter Dampf kann also nicht wie die Luft zusammengedrückt werden. Die geringste Verminderung des Volums hat eine Verdichtung zur Folge.

Ein ganz anderes Verhalten zeigt der ungesättigte Dampf. Dalton brachte in die Torricellische Leere (A, Fig. 76) etwas Wasser, aber nur so wenig, daß noch mehr hätte verdampfen können, daß also der luftleere Raum mit ungesättigtem Dampf angefüllt war. Dieser ungesättigte Dampf übt auf das Quecksilber einen gewissen Druck aus, der aber geringer ist als der Druck, den gesättigter Dampf von derselben Temperatur ausüben würde.

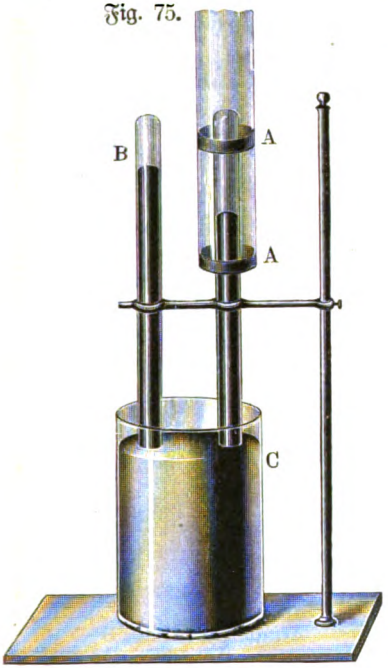
Wird jetzt das Rohr tiefer in das Quecksilber eingetaucht, so wird das Volum des Dampfes kleiner und der Druck größer, aber es findet keine Ver-

Digitized by Google

dichtung statt. Bei genaueren Untersuchungen fand Dalton, daß sich der ungesättigte Dampf wie die Luft verhält, d. h. daß das Volum in demselben Verhältnis abnimmt wie der Druck zunimmt.

Wird das Rohr hinreichend tief in das Quecksilber eingetaucht, so geht der ungesättigte Dampf schließlich in gesättigten Dampf über. Sobald dies eingetreten ist, bewirkt eine weitere Verminderung des Volums nicht mehr eine Erhöhung des Druckes, sondern sie hat die Verdichtung eines Teiles des Dampfes zu flüssigem Wasser zur Folge.

Fig. 75.



Druck des gesättigten Dampfes.

Fig. 76.

Druck des ungesättigten Dampfes.

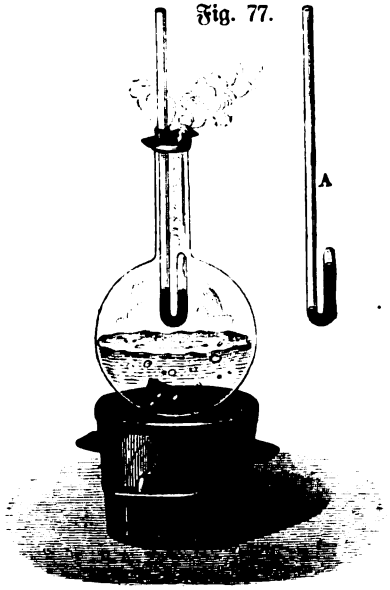
Dalton fand also, daß der Wasserdampf gesättigter Dampf ist, wenn er den größten Druck ausübt, der bei der herrschenden Temperatur möglich ist.

§ 82. Bei einem seiner Versuche füllte Dalton den Zwischenraum zwischen dem Barometerrohr und dem Umhüllungsrohr (Fig. 75) mit kochendem Wasser. Der gesättigte Dampf in dem luftleeren Raume wurde so auf 100° C erwärmt und der von ihm ausgeübte Druck war so groß, daß das Quecksilber im Rohre bis auf das Niveau des Quecksilbers im Gefäß *C* herabgedrückt wurde. Hieraus folgt, daß der Druck des Dampfes bei 100° gleich dem Luftdruck ist, und Dalton zieht den allgemeinen Schluß, daß der Siedepunkt einer Flüssigkeit diejenige Temperatur ist, bei welcher die Spannkraft des Dampfes gleich dem auf der Oberfläche der Flüssigkeit ruhenden Drucke ist. Hierdurch erklärt es sich, warum sich der Siedepunkt mit dem Luftdruck (oder dem Dampfdruck im Kessel) ändert, und warum lauwarmes Wasser unter der Glocke der Luftpumpe ins Sieden kommt, wenn die Luft verdünnt wird.

Digitized by Google

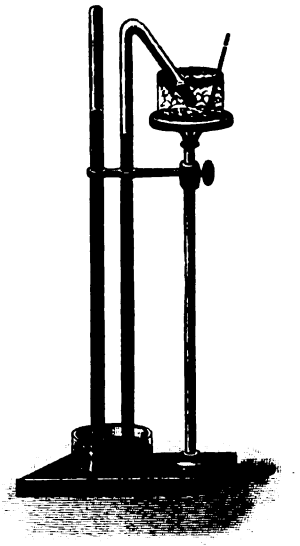
Der Versuch über den Dampfdruck beim Siedepunkt läßt sich leicht vermittelst eines U-förmig gebogenen Rohres ausführen, welches eine geeignete Menge Quecksilber und über diesem in dem kürzeren, geschlossenen Schenkel etwas Wasser enthält (Fig. 77). Senkt man das Rohr in eine Flasche mit siedendem Wasser, so stellt sich das Quecksilber in beiden Schenkeln auf dieselbe Höhe. Hieraus geht hervor, daß der Druck des im geschlossenen Schenkel entstehenden gesättigten Dampfes gleich dem Luftdruck ist.

Fig. 77.



Dampfdruck beim Siedepunkt.

Fig. 78.



Dampfdruck unter 0° C.

§ 83. Das Wasser verdampft auch bei Temperaturen unter dem Eispunkt. Dalton zeigte dies, indem er zwei Barometer nebeneinander stellte, von denen das eine so eingerichtet war, daß der luftleere Raum in eine Kältemischung eingetaucht werden konnte. In das letztere Barometer wurde etwas Wasser gebracht, das also den Raum über dem Quecksilber mit Dampf anfüllte. Dieser Dampf übte einen der Temperatur entsprechenden Druck auf das Quecksilber aus. Der Druck war zwar nicht groß, aber doch, selbst bei sehr starker Kälte, deutlich bemerkbar.

Daß das Eis auch bei Temperaturen unter 0° verdampft, kann man leicht daran erkennen, daß feuchte Wäsche auch im gefrorenen Zustande leicht trocken wird, ebenso daran, daß eine glatte Eisfläche, in die man (nicht zu tiefe) Linien einritzt, nach einiger Zeit wieder spiegelblank wird.

§ 84. Der Dampfdruck bei Temperaturen über 100° C wurde sehr genau von dem bereits erwähnten französischen Physiker Regnault gemessen.

Henri Victor Regnault war 1810 in Aachen geboren. Er erhielt seine naturwissenschaftliche Ausbildung auf der Polytechnischen Schule in

Digitized by Google

Paris. Bis zum Jahre 1840 beschäftigte er sich hauptsächlich mit Chemie, später dagegen vorzugsweise mit physikalischen Messungen. Regnault war ein genialer Forscher, der es verstand, seine Apparate so zu konstruieren und seine Versuche so auszuführen, daß die unvermeidlichen Fehler fast unmerklich wurden. Er nimmt in der Geschichte der Naturwissenschaften eine Stellung ersten Ranges als unübertroffener Experimentator ein, und seine Arbeiten haben wesentlich dazu beigetragen, daß man die Gesetze, die sich unter den gewöhnlichen Bedingungen der Temperatur, des Druckes u. s. w. als richtig erwiesen, nicht als allgemeingültige Naturgesetze betrachtet (vergl. I., § 259). Außer seiner Messung des Dampfdruckes sind zu erwähnen seine Messungen der spezifischen Gewichte der Gase, der Ausdehnung der Gase und Flüssigkeiten durch die Wärme, der gebundenen Wärme des Wasserdampfes, der spezifischen Wärme der Körper, des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft, der Zusammendrückbarkeit der Gase und Flüssigkeiten und der Geschwindigkeit des Schalles. Noch jetzt sind auf verschiedenen Gebieten die von Regnault gefundenen Resultate die besten, welche man hat. Seine wichtigsten Arbeiten erschienen von 1847 bis 1862.

Fig. 79.

Henri Regnault.

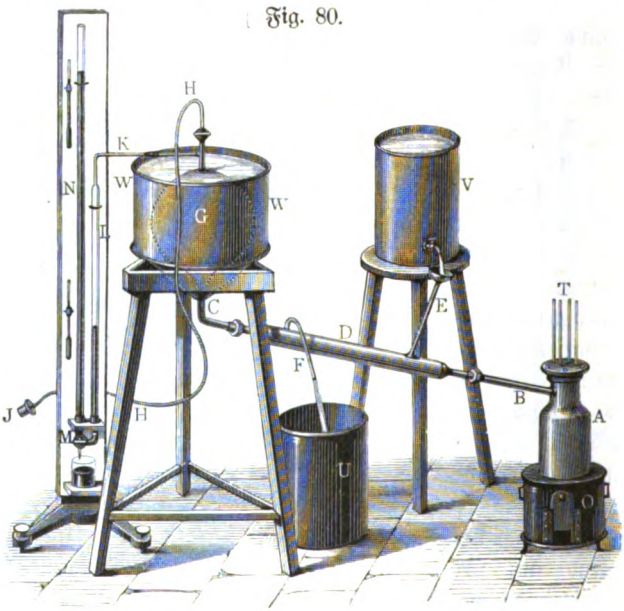
Regnault war an verschiedenen Instituten, zuletzt am Collège de France als Lehrer der Chemie und Physik tätig. Auch in der Bergverwaltung hat er längere Zeit ein wichtiges Amt bekleidet. Seit 1854 war er Direktor der Porzellanfabrik in Sèvres. Er starb 1878 in Auteuil.

§ 85. Bei der Messung des Dampfdruckes bei Temperaturen über 100° C benutzte Regnault den Umstand, daß die Temperatur einer Flüssigkeit steigt, bis sie anfängt zu sieden. Von diesem Augenblicke an ändert sich die Temperatur nicht, solange das Sieden anhält. Der Apparat, dessen sich Regnault bei seinen Untersuchungen bediente, ist in Fig. 80 (a. f. S.) abgebildet. Der kleine Dampfkessel A ist luftdicht verschlossen. In den Deckel sind vier am unteren Ende geschlossene Röhren eingelassen, von denen zwei bis in die Nähe des Bodens, zwei bis in die Mitte des Kessels hinabreichen. In jeder

Digitized by Google

dieſer Röhren, die mit Queckſilber gefüllt ſind, ſteht ein Thermometer. Der Keſſel iſt durch das Rohr *B* mit der Kugel *G* verbunden, die in einem Behälter mit Waſſer liegt. Die Kugel ſteht mit dem offenen Manometer *N* und einer Luftpumpe in Verbindung, mit der letzteren, die in der Figur nicht abgebildet iſt, durch das Rohr *HJ*. Durch die Pumpe wird Luft in die Kugel eingepreßt. Der Druck derſelben wirkt gleich ſtark auf die Oberfläche des Waſſers und auf das Queckſilber des Manometers, an dem die Größe des Druckes abgeleſen wird. Wenn nun in dem Keſſel Dampf entwickelt wird, ſo würde dieſer den Druck ſtetig erhöhen. Dies wird aber dadurch

Fig. 80.



Meſſung des Dampfdruckes über 100°.

verhindert, daß der Dampf in dem Rohre *B*, welches von dem Kühlrohre *D* umgeben iſt, verdichtet wird. Infolge der Verdichtung des Dampfes wird der Druck auf die Oberfläche des Waſſers nicht erhöht. Vermittelſt der vier Thermometer, von denen zwei die Temperatur des Waſſers und zwei die Temperatur des Dampfes angeben, können die Temperaturänderungen im Keſſel verfolgt werden. Anfangs ſteigt die Temperatur im Keſſel. Sobald aber das Waſſer ſiedet, d. h. ſobald die Spannkraft des Dampfes gleich dem auf der Oberfläche des Waſſers ruhenden Druck iſt, zeigen alle vier Thermometer dauernd dieſelbe Temperatur. Das Waſſer im Keſſel kann nun im Sieden erhalten werden, ohne daß ſich die Temperatur ändert. Der in dem Keſſel entſtehende Dampf wird in dem abgekühlten Rohre wieder verdichtet.

Man erfährt alſo durch einen ſolchen Verſuch, wie groß der Druck des geſättigten Dampfes bei der von den Thermometern angezeigten Temperatur

Digitized by Google

ist. Der Dampfdruck ist nämlich ebenso groß wie der auf der Oberfläche des Wassers ruhende Druck, der am Manometer abgelesen wird.

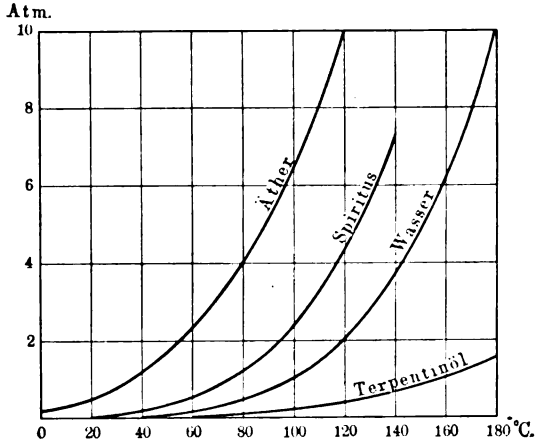
In derselben Weise läßt sich auch der Druck des Dampfes anderer Flüssigkeiten ermitteln.

In der folgenden Tabelle ist der Druck des Wasserdampfes, des Spiritusdampfes und des Ätherdampfes für verschiedene Temperaturen angegeben, und zwar in Millimetern Quecksilber (I., § 234).

Temperatur (C)	Wasserdampf	Spiritusdampf	Ätherdampf
− 20°	—	3,2	68,9
0°	4,6	13,0	184,0
+ 20°	17,4	44,0	433,0
+ 40°	54,0	134,0	907,6
+ 60°	148,9	350,0	1725,0
+ 80°	354,9	813,0	3023,0
+ 100°	760,0	1698,0	4953,0
+ 120°	1 491,3	3232,0	7719,0
+ 140°	2 717,6	5675,0	—
+ 160°	4 651,6	—	—
+ 180°	7 446,4	—	—
+ 200°	11 689,0	—	—

Der Dampfdruck nimmt also in einem viel stärkeren Verhältnis zu als die Temperatur. In Fig. 81 ist die Zunahme des Druckes bei steigender Temperatur für Wasserdampf, Spiritusdampf, Ätherdampf und Terpentinöldampf graphisch dargestellt. Horizontal ist die Temperatur und vertikal der zugehörige Dampfdruck in Atmosphären (I., § 243) abgetragen. Eine Spannkraft von sechs Atmosphären erreicht der Ätherdampf bei ungefähr 95°, der Weingeistdampf bei 131° und der Wasserdampf bei 159°.

Fig. 81.



Dampfdrucklinien.

§ 86. Die Versuche Daltons hatten zur Folge, daß die alte Theorie, nach welcher der Dampf eine Lösung von Wasser in Luft sein sollte, aufgegeben werden mußte. Dalton fand nämlich, daß Dampf im lufterfüllten Raume dieselbe Dichtigkeit annimmt wie im luftleeren Raume. Die Luft spielt

Digitized by Google

demnach bei der Dampfbildung keine wesentliche Rolle. Gesättigter Dampf hat bei einer bestimmten Temperatur dieselbe Spannung, einerlei ob er sich in der Luft oder im luftleeren Raume befindet. Nur geht die Dampfbildung im luftleeren Raume schneller vor sich als im lufterfüllten Raume. Die Dampfteilchen und die Luftteilchen können also, wie es scheint, in demselben Raume enthalten sein, ohne aufeinander einzuwirken. Die Lösungstheorie muß daher offenbar aufgegeben werden. Die Menge des Dampfes, welche in einem Raume enthalten sein kann, ist nur von der Temperatur und nicht von der etwa anwesenden Luft abhängig. Der von einem Gemische von Luft und Dampf ausgeübte Druck ist, wie Dalton fand, gleich der Summe des von der Luft und des vom Dampf ausgeübten Druckes.

Dasselbe gilt, wie Dalton zeigte, für den Druck in Gemischen verschiedener Luftarten. Sperrt man gleich große Volume verschiedener Luftarten von ungleichem Druck ab und sammelt sie in einem Raume, der so groß ist wie das Volum jeder einzelnen Luftart, so wird der Druck des Gemisches gleich der Summe der Drucke der einzelnen Luftarten. Dieses Gesetz hat jedoch keine absolute Gültigkeit, denn dann würde auch das Boylesche Gesetz absolut richtig sein, was es ja tatsächlich nicht ist. Denkt man sich nämlich einen Behälter, der eine bestimmte Luftart enthält, mit einem zweiten Behälter von gleicher Größe, der eine andere Luftart von demselben Druck wie die erste enthält, in Verbindung gesetzt, so nimmt jede der beiden Luftarten nach der Mischung das doppelte Volum ein, und wenn nun das Daltonsche Gesetz richtig sein sollte, so müßte auch das Boylesche Gesetz absolut richtig sein, d. h. jede der beiden Luftarten müßte einen halb so großen Druck ausüben als vorher.

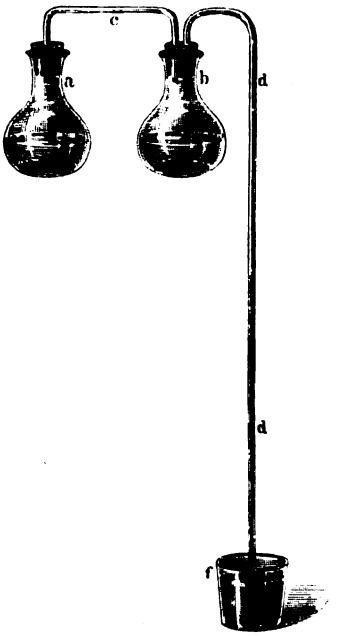
§ 87. James Watt führte eine eingehende Untersuchung der Eigenschaften des Wasserdampfes aus. Er untersuchte, wie erwähnt, den Wärmeverbrauch bei der Verdampfung und die Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Temperatur. Genauer wurden diese Messungen, wie wir gesehen haben, von späteren Forschern ausgeführt. Watt suchte aber auch die Gesetze für die Verdichtung des Dampfes zu ermitteln. Es war ihm klar, daß die Newcomensche Maschine zu viel Dampf verbrauchte, und daß dies namentlich dadurch verursacht wurde, daß bei jeder Kolbenbewegung kaltes Wasser in den Zylinder gespritzt wurde. Wenn nämlich dann wieder der Dampf eingelassen wurde, mußte dieser den Zylinder von neuem erwärmen und auf diese Weise wurden beträchtliche Mengen Dampf verbraucht. Watt war sich selbstverständlich darüber klar, daß der Dampf unter dem Kolben schnell verdichtet werden muß, da andernfalls der Gang der Maschine ein träger gewesen sein würde. Er suchte nun die schnelle Verdichtung zu erreichen, ohne daß der Zylinder abgekühlt wurde. Zuerst ersetzte er den eisernen Zylinder durch einen hölzernen, der seine Temperatur nicht so schnell ändert. Allein der hölzerne Zylinder änderte seine Form und der Kolben schloß daher nicht dampfdicht. Watt ging daher wieder zum eisernen Zylinder über und verband diesen durch ein Rohr mit einem Behälter. Wenn nun der Dampf

Digitized by Google

aus dem Zylinder ausströmen sollte, wurde ein Hahn in dem Verbindungsrohr geöffnet, so daß sich der Dampf auf den Zylinder und den Behälter verteilte. Wenn aber der letztere kaltes Wasser enthielt, so ging sozusagen sämtlicher Dampf des Zylinders in kaltes Wasser über.

Watt fand nämlich, daß der Druck (und also auch die Menge) des Dampfes allein von der niedrigsten Temperatur abhängt, die irgendwo in dem von dem Dampf eingenommenen Raum herrscht. Wird also der warme und mit Dampf gefüllte Zylinder mit einem kalten Behälter in Verbindung gesetzt, so bekommt der Dampfdruck im Zylinder augenblicklich eine Größe, die der Temperatur in dem kalten Behälter entspricht. Watt zeigte dies, indem er einen Behälter, der mit einem geschlossenen Blechrohr verbunden war, mit Dampf füllte und dann das Blechrohr in kaltes Wasser eintauchte. Der Dampf wurde so vollständig verdichtet, daß das Blechrohr durch den Luftdruck zusammengedrückt wurde.

Fig. 82.



Kondensator.

Sehr deutlich läßt sich diese Wirkung der Abkühlung durch den in Fig. 82 abgebildeten Apparat veranschaulichen, dessen Einrichtung ohne weiteres aus der Abbildung ersichtlich ist. Die beiden Fläschchen enthalten eine Flüssigkeit, z. B. Äther, der sich wegen seines niedrigen Siedepunktes gut zur Ausführung des Versuches eignet. Man erwärmt zunächst den Äther durch Eintauchen der Fläschchen in heißes Wasser zum Sieden und taucht dann, nachdem die Luft ausgetrieben ist, das Rohr *d* in ein Gefäß mit Quecksilber ein. Wenn sich dann die Fläschchen abkühlen, steigt das Quecksilber in dem Rohr in die Höhe.

Das Fläschchen *a* wird jetzt in kaltes Wasser gestellt, und nachdem sich das Quecksilber in dem Rohr *d* auf die dem herrschenden Druck entsprechende Höhe eingestellt hat, wird der Äther in *b* durch Eintauchen des Fläschchens in heißes Wasser zum Sieden gebracht. Trotz der Dampfbildung ändert sich der Druck in dem dampferfüllten Raume nicht. Der in *b* entstehende Dampf wird in *a* verdichtet und die Höhe der Quecksilbersäule bleibt unverändert.

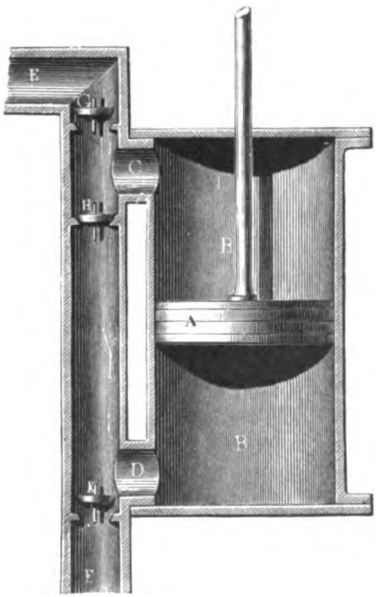
§ 88. Watt nannte den kalten Behälter Kondensator. Mit Hilfe desselben konnte er den Dampf aus dem Zylinder fortschaffen, ohne diesen abzukühlen. Der Kondensator wurde dadurch kalt gehalten, daß fortwährend durch eine von der Maschine selbst bewegte Pumpe kaltes Wasser eingespritzt wurde. Eine andere Pumpe, die Warmwasserpumpe, saugt das Wasser aus

Digitized by Google

dem Kondensator heraus. Diese Pumpe wird auch Luftpumpe genannt, weil sie außer dem Wasser auch die Luft aus dem Kondensator entfernt, die durch das kalte Wasser und durch den Dampf fortwährend in den Kondensator eingeführt wird. Eine dritte Pumpe drückt das warme Wasser in den Kessel, wodurch eine erhebliche Ersparnis von Brennmaterial erzielt wird.

Der Gang dieser verbesserten Newcomenschen atmosphärischen Maschine, wie sie Watt nannte, war der folgende. Befindet sich der Stempel in der tiefsten Stellung, so wird die Verbindung mit dem Kondensator unterbrochen und der Dampf zugelassen. Der Kolben geht in die Höhe, und wenn er die höchste Stellung erreicht hat, wird der Dampf abgesperrt und die Verbindung mit dem Kondensator hergestellt. Der Dampf tritt in diesen ein und der Kolben wird durch den Luftdruck hinabgedrückt.

Fig. 83.



Bewegung des Kolbens durch Dampfdruck.

§ 89. Nun erkannte Watt, daß noch eine wesentliche Quelle für Dampfverlust darin lag, daß bei jeder Kolbenbewegung kalte Luft in den Zylinder eindrang und diesen abkühlte.

Er beschloß daher, auf die Mitwirkung des Luftdruckes ganz zu verzichten und den Kolben durch Dampfdruck zu bewegen. Aus seinen Untersuchungen über den Dampfdruck wußte er, daß dieser etwas über 100° bedeutend größer als der Luftdruck ist. Er verschloß den Zylinder mit einem dicht schließenden Deckel, durch den die Kolbenstange dampfdicht hindurchging. Der Dampf strömt durch *E* (Fig. 83) ein, während das Ventil *G* geöffnet und *H* geschlossen ist. Er drückt also den Kolben nach unten. Der Raum unter dem Kolben steht mit dem Kondensator in Verbindung, da das Ventil *K* offen ist. Wenn der Kolben unten im Zylinder angekommen ist, werden die Ventile *G* und *K* geschlossen, das Ventil *H* dagegen wird geöffnet. Jetzt ist der Zylinder sowohl vom Kessel, als auch vom Kondensator abgesperrt, und da sich auf beiden Seiten des Kolbens Dampf befindet (*H* ist offen), so ist der Kolben in seiner Bewegung nicht gehindert. Das Gegengewicht am Balancier (vgl. § 65) zieht daher den Kolben in die Höhe. *H* wird geschlossen, *G* und *K* werden geöffnet, der Raum über dem Kolben füllt sich von neuem mit Dampf, während der verbrauchte Dampf durch *K* in den Kondensator geht.

Hiermit war die atmosphärische Maschine in eine wirkliche Dampfmaschine umgewandelt. Eine derartige Maschine kann auch kräftig wirken.

Digitized by Google

wenn der Kolben einen geringen Querschnitt hat, da sich der Dampfdruck leicht auf das Mehrfache des Luftdrucks steigern läßt. Das Innere des Zylinders einer solchen Maschine kommt mit der Luft nicht in Berührung. Um den Zylinder vor Abkühlung zu beschützen, gab ihm Watt eine doppelte Wand und füllte den Zwischenraum mit Dampf (Dampfmantel).

§ 90. Die Versuche mit dieser Maschine nahmen Watt so sehr in Anspruch, daß er seine Stellung als Universitätsmechaniker aufgab. Er hatte sich inzwischen verheiratet und mußte auch aus diesem Grunde darauf bedacht sein, seine Einnahmen zu erhöhen. Er übernahm Landmesser- und Ingenieurarbeiten, aber in seiner freien Zeit beschäftigte er sich fortwährend mit seiner Maschine, von der er nur ein Modell besaß. Er machte jetzt aber die Bekanntschaft eines vermögenden Mannes, Dr. Roebuck, durch dessen Mitwirkung die Herstellung einer großen Maschine ermöglicht wurde. Watt und Roebuck erhielten 1769 ein Patent auf Watts Maschine, und in demselben Jahre wurde eine solche in einem Kohlenbergwerk in Kinneil aufgestellt. Dr. Roebuck mußte sich jedoch kurz darauf zurückziehen, weil er sein Vermögen bei anderen Unternehmungen eingebüßt hatte. Watt wandte sich nun wieder anderen Arbeiten zu. Er leitete die Austiefung des Hafens von Glasgow und wirkte bei der Erbauung des Kaledonischen Kanals in Nordschottland mit, der den Atlantischen Ozean mit der Nordsee verbindet.

Im Jahre 1773 erklärte sich Matthew Boulton, ein vermögender Eisenwarenhändler in Soho bei Birmingham bereit, gemeinsam mit Watt die Verbesserung der Dampfmaschine von neuem in Angriff zu nehmen. Watt nahm das Anerbieten an und siedelte nach Birmingham über. Das Patent, welches demnächst abgelaufen wäre, wurde erneuert, und kurz darauf stand in Soho eine große Wattsche Maschine zum Gebrauch bereit.

Die neue Maschine fand jedoch bei den Grubenbesitzern anfangs wenig Anklang, weil sie bedeutend teurer als die Newcomensche Maschine war. Watt und Boulton erboten sich daher, die Maschine ohne Bezahlung aufzustellen, indem sie als Vergütung den dritten Teil der Kohlen für sich beanspruchten, welche gespart werden würden, wenn an Stelle der Newcomenschen Maschine die neue Maschine gebraucht werde. Sie machten mit dieser Bedingung gute Geschäfte. Von einer einzigen Grube bekamen sie z. B. jährlich etwa 50 000 Mark.

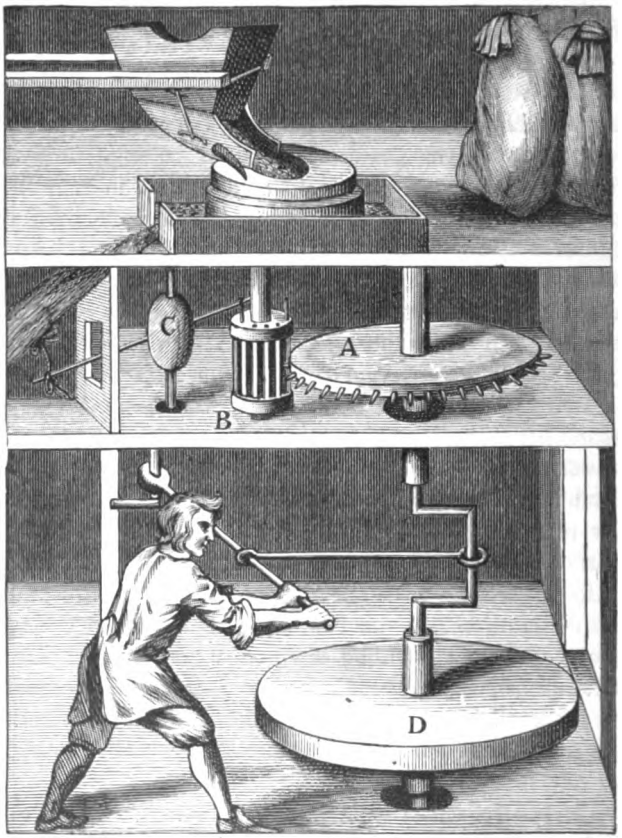
§ 91. In den folgenden Jahren setzte Watt alle seine Kräfte ein, um die Maschine zu vervollkommnen. Zunächst hatte sie nur zum Betriebe von Pumpwerken Anwendung gefunden, wo es sich nur um eine auf- und niedergehende Bewegung handelt und wo nur eine Kraftentwickelung erforderlich ist, wenn der Kolben niedergeht, da dieser durch ein Gegengewicht am Balancier wieder gehoben wird. Watt erkannte, daß die Maschine eine ganz andere Bedeutung bekommen würde, wenn es gelänge, sie so umzugestalten, daß sie eine drehende Bewegung erzeugen könne. Sie würde dann geeignet sein, jede beliebige Arbeitsmaschine, die von einer Welle getrieben wird, in Bewegung zu setzen.

Wie sich eine hin und her gehende Bewegung in eine drehende Bewegung

Digitized by Google

umwandeln läßt, ist eine alte bekannte Sache. In Fig. 84, der Kopie einer aus dem 16. Jahrhundert stammenden Abbildung, sieht man, wie ein Mann eine Mühle in Bewegung setzt, indem er eine Stange hin und her bewegt. Die Bewegung wird durch eine zweite Stange, die Bleuelstange, auf die Welle der Mühle übertragen, die an der Stelle, wo die Bleuelstange angreift, zu einem Krummzapfen (vgl. I, § 222) umgebogen ist. Es ist leicht einzusehen, daß es zwei Stellungen des Krummzapfens gibt, in denen die

Fig. 84.



Eine Mühle nach einem Bild aus dem 16. Jahrhundert.

Bleuelstange nur einen Zug oder einen Druck auf denselben ausübt, ohne eine Drehung zu bewirken. Diese beiden Stellungen heißen die toten Punkte, und die Bedingung dafür, daß die Mühle in gleichförmiger Bewegung erhalten werden kann, ist die, daß sich die Maschine selbst über die toten Punkte hinweghilft. Hierzu dient die schwere Scheibe *D*, das sogenannte Schwungrad. Hat nämlich die Welle nebst der Scheibe eine gewisse Geschwindigkeit, so erhält sich die Bewegung, auch wenn die bewegende Kraft einen Augenblick

Digitized by Google

zu wirken aufhört, indem diese durch die Bewegungsenergie ersetzt wird (vgl. I, § 182). Das Schwungrad dient aber nicht nur dazu, die toten Punkte zu überwinden, sondern es hat auch den Zweck, die Bewegung gleichförmig zu machen, wenn die bewegende Kraft mit veränderlicher Stärke wirkt, wie es fast immer der Fall ist, wenn die Achse vermittelst eines Krummzapfens bewegt wird. Denkt man sich die Kraft in zwei Komponenten zerlegt, von denen die eine in die Richtung der Tangente, die andere in die Richtung des Radius fällt, so gibt die erstere Komponente denjenigen Teil der gesamten Kraft an, der die Drehung bewirkt, die letztere dagegen denjenigen Teil, welcher einen Druck gegen die Achse ausübt. Die erstere Komponente ist in den toten Punkten gleich Null und hat in der Mitte zwischen diesen beiden Punkten ihren größten Wert. Während der Drehung nimmt die Größe dieser Kraft also fortwährend ab und zu, und die Bewegung, welche die Kraft bewirkt, würde daher ungleichförmig sein, wenn sie nicht durch die Wirkung des Schwungrades zu einer gleichförmigen gemacht würde. Wenn die bewegende Kraft abnimmt, wirkt das Schwungrad beschleunigend, und wenn die Kraft zunimmt, wirkt das Schwungrad verzögernd. Damit das Schwungrad seine Aufgabe in richtiger Weise erfüllen kann, muß es eine der Umdrehungsgeschwindigkeit und den Veränderungen der bewegenden Kraft entsprechende Größe und Masse haben. Natürlich kann das Schwungrad nicht die Bewegung gleichförmig erhalten, wenn die bewegende Kraft oder der Widerstand größer oder kleiner wird.

Um die Maschine zum Drehen einer Welle benutzen zu können, brachte Watt unter jedem Ende des Balanciers einen Zylinder mit Kolben an, so daß sich die Kolben gegenseitig in die Höhe zogen und der Balancier vermittelst einer Treibstange und einer Kurbel eine Welle mit Schwungrad in Drehung versetzte.

Watt gewann jedoch die Überzeugung, daß es zweckmäßig sei, nur einen Kolben zu verwenden, diesen aber sowohl aufwärts als abwärts durch den Dampfdruck zu bewegen. Dies führte ihn zur Konstruktion der **doppeltwirkenden Maschine.**

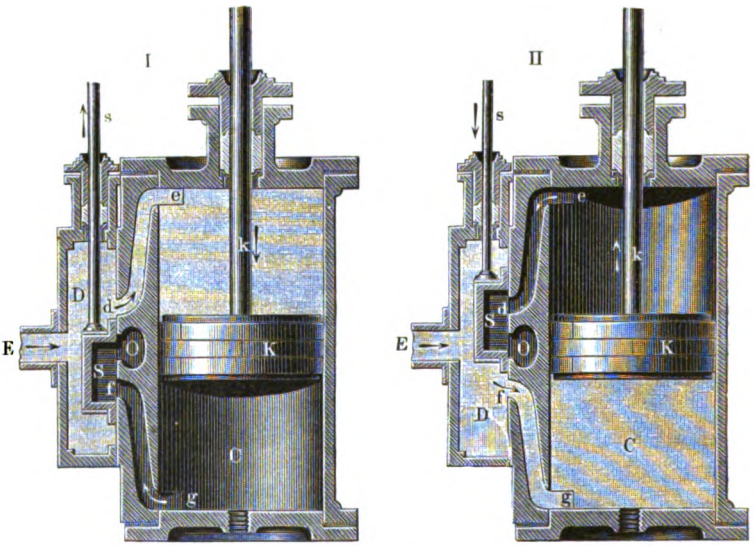
§ 92. Bei dieser Maschine wird der Dampf dem Zylinder durch den sog. **Verteilungsschieber** zugeführt. Heutzutage gibt es eine große Anzahl verschiedener Schieber, die jedoch sämtlich als Abänderungen des Wattschen Schiebers zu betrachten sind. An der einen Wand des Zylinders ist der Schieberkasten *CE* (Fig. 85) angebracht. In diesem wird der Schieber, eine Art Schale oder Muschel, von der Schieberstange so hin und her bewegt, daß er mit seinem abgeschliffenen Rande auf der Wand des Schieberkastens gleitet. Der Schieberkasten ist mit dem Zylinder durch die beiden Kanäle *de* und *fg* verbunden, von denen der eine nach dem oberen, der andere nach dem unteren Teil des Zylinders führt. Der Verteilungsschieber bedeckt nun bei seiner hin und her gehenden Bewegung abwechselnd die eine und die andere der beiden Öffnungen *d* und *f*, so daß der Schieberkasten abwechselnd mit dem Raum oberhalb und dem Raum unterhalb des Zylinders in Verbindung kommt.

Digitized by Google

In der Mitte zwischen den beiden Öffnungen *d* und *f* befindet sich eine dritte Öffnung, *O*, die immer vom Schieber bedeckt wird und durch die der Raum unter dem Schieber, folglich auch abwechselnd der eine und der andere Teil des Zylinders, mit dem Kondensator in Verbindung steht.

Bei einer gewissen Stellung des Schiebers (Fig. 85) tritt der Dampf in den unteren Teil des Zylinders ein, während der Dampf aus dem oberen

Fig. 85. Fig. 86.



Doppeltwirkender Zylinder mit Verteilungsschieber.

Teil durch *O* austritt und im Kondensator verdichtet wird. Noch ehe der Kolben seine höchste Stellung erreicht, bewegt sich der Schieber so weit abwärts, daß die Öffnungen *d* und *f* beide bedeckt werden und also kein Dampf mehr eintreten kann. Wenn der Kolben in der höchsten Stellung ankommt (Fig. 86), öffnet sich der Weg *de* für den Eintritt des Dampfes in den Raum oberhalb des Kolbens, während der Dampf unterhalb des Kolbens durch den Kanal *gf*, dessen Mündung jetzt vom Schieber bedeckt wird, nach dem Kondensator abgeleitet wird. Noch ehe der Kolben die tiefste Stellung erreicht, werden die Öffnungen *d* und *f* beide bedeckt, und wenn er unten ankommt, kommt wieder der obere Teil des Zylinders mit dem Kondensator und der untere Teil mit dem Schieberkasten in Verbindung u. s. w.

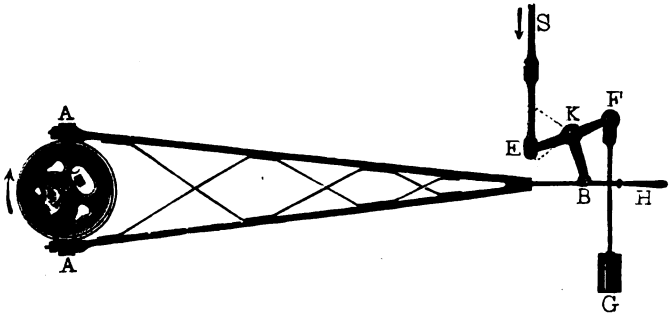
Der Verteilungsschieber macht also die Hähne überflüssig. Aber ebenso wie die Hähne zur rechten Zeit geschlossen werden mußten, müssen auch die Bewegungen des Schiebers immer zur rechten Zeit erfolgen, d. h. wenn sich der Kolben in einer bestimmten Stellung befindet.

Die Bewegung des Schiebers bewirkte Watt dadurch, daß er auf der von der Kurbel gedrehten Welle der Maschine eine kreisförmige Scheibe an-

Digitized by Google

brachte, deren Mittelpunkt nicht mit dem Mittelpunkt der Welle zusammenfällt (Fig. 87). Um den Rand dieser sog. exzentrischen Scheibe herum liegt ein Ring, der an den Stangen *A* und *B* befestigt ist. Diese wirken auf den Winkelhebel *BKE*, der sich um *K* dreht. Macht nun die Welle eine halbe Umdrehung, was ja einem halben Kolbenschlag entspricht, so kommt der breite Teil der Scheibe auf die andere (in der Figur die linke) Seite, der Punkt *B* wird nach links gezogen, und der Hebelarm *KE* nach oben bewegt, also die Stange *S* gehoben. Bei der weiteren Drehung der Welle

Fig. 87.



Exzentrische Scheibe.

kehrt der Ring und folglich auch die Stange *S* in die frühere Lage zurück. Während eines jeden Kolbenschlages macht also die Stange *S* eine auf und nieder gehende Bewegung, und wenn *S* mit dem Verteilungsschieber verbunden ist, so macht auch dieser bei jedem Kolbenschlag eine hin und her gehende Bewegung. Dadurch, daß man die exzentrische Scheibe in der richtigen Stellung auf der Welle anbringt, läßt es sich erreichen, daß die Bewegung des Schiebers immer zur rechten Zeit in Beziehung auf die Bewegung des Kolbens eintritt.

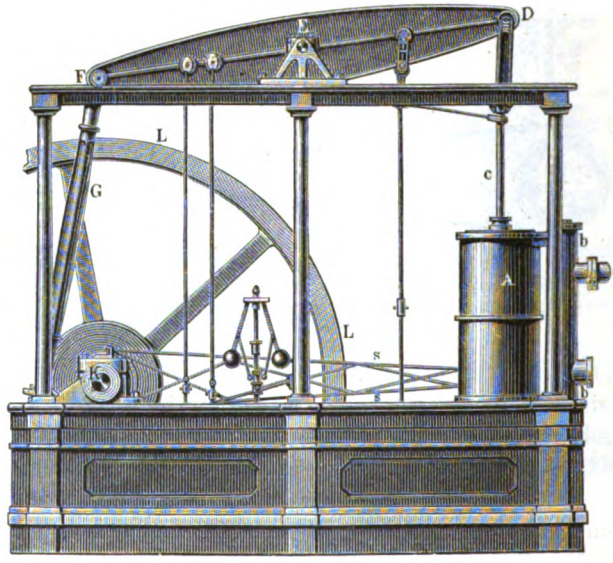
§ 93. Ein Schwungrad kann, wie gesagt, nicht hindern, daß die Maschine zu schnell oder zu langsam läuft. Das Schwungrad kann nur Geschwindigkeitsänderungen von kurzer Dauer ausgleichen. Wenn daher der von der Maschine zu überwindende Widerstand geringer wird, so wird der Kolben durch den Dampfdruck schneller bewegt und infolgedessen bewegt sich auch das Schwungrad schneller. Umgekehrt, wenn der Widerstand größer wird, so bewegt sich der Kolben und also auch das Schwungrad langsamer. Wenn daher die Maschine annähernd mit derselben Geschwindigkeit laufen soll, einerlei, ob der zu überwindende Widerstand größer oder kleiner ist, so muß das Zuströmen des Dampfes reguliert werden. Hierzu benutzte Watt das konische Pendel, welches damals zur Regulierung von Getreidemühlen diente.

Die Bewegung der Welle wird durch zwei Kegelräder auf die vertikale Achse *a* (Fig. 90 a. S. 98) des konischen Pendels übertragen. Wenn der Dampf stärker zuströmt und die Maschine schneller läuft, so fliegen die

Digitized by Google

Kugeln dieſes Zentrifugalregulators etwas weiter auseinander. Infolgedeſſen wird die Hülſe *h* und die mit ihr verbundene Stange *b* etwas gehoben und dadurch eine Klappe (das Droſſelventil) in dem Dampfzuleitungsrohr (unterhalb des Schieberkaſtens *K*) ſo gedreht, daß das Zuſtrömen des Dampfes vermindert wird. Wenn das Zuſtrömen des Dampfes abnimmt, ſo nähern ſich die Kugeln der Achſe und das Droſſelventil dreht ſich im entgegengeſetzten Sinne, d. h. ſo, daß das Zuſtrömen des Dampfes geſteigert wird. In dieſer Weiſe wird durch die Maſchine ſelbſt die Triebkraft (Dampf) reguliert und

Fig. 88.



Wattſche Niederdruckmaſchine.

alſo die Geſchwindigkeit ſo gut wie möglich gleichförmig gemacht. Ganz unverändert kann der Zentrifugalregulator die Geſchwindigkeit der Maſchine jedoch nicht erhalten, da ſich die Kugeln mehr oder weniger weit von der Achſe des Regulators entfernen müſſen, um die Regulierung zuſtande zu bringen. Eine veränderte Stellung der Kugeln iſt aber nur bei einer etwas veränderten Geſchwindigkeit möglich.

§ 94. Die nähere Einrichtung einer Wattſchen doppeltwirkenden Maſchine iſt aus Fig. 88 und 89 erſichtlich. Die erſtere ſtellt eine Geſamtanſicht der Maſchine, die letztere einen Durchſchnitt durch den unteren Teil derſelben dar. Der Dampf tritt rechts durch das Rohr *a* in den Schieberkaſten und aus dieſem in den Zylinder *A* ein. Bei der durch die Figur veranſchaulichten Stellung des Verteilungsſchiebers und des Kolbens tritt der Dampf in den oberen Teil des Zylinders ein und der Kolben bewegt ſich abwärts. Durch den Balancier *DF* und die Treibſtange *G* wird die Achſe

Digitized by Google

K mit dem Schwungrad *L* in Bewegung geſetzt. Der Raum unterhalb des Kolbens ſteht mit dem Kondenſator *e* in Verbindung, in den fortwährend durch das Rohr *g* kaltes Waſſer eingepumpt wird. Das kalte Waſſer wird durch die Pumpe *q* in den den Kondenſator umgebenden Raum gepumpt. Aus dieſem ſaugt die Pumpe *h* das Waſſer durch das Rohr *nn* in die Druck-

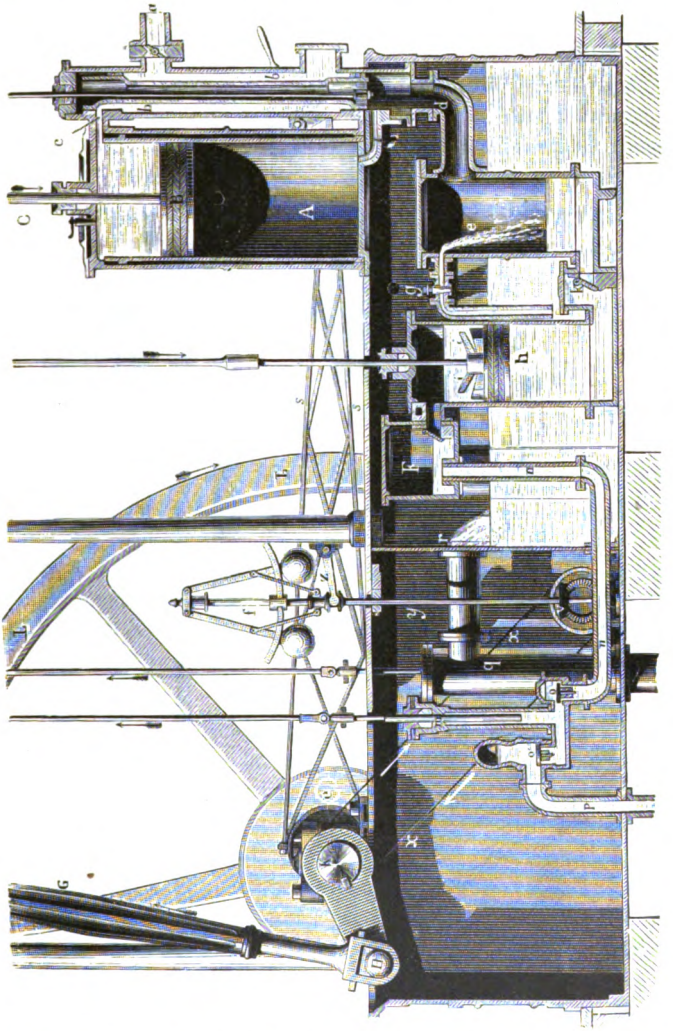


Fig. 89. Wattſche Niederdruckmaſchine. Durchſchnitt.

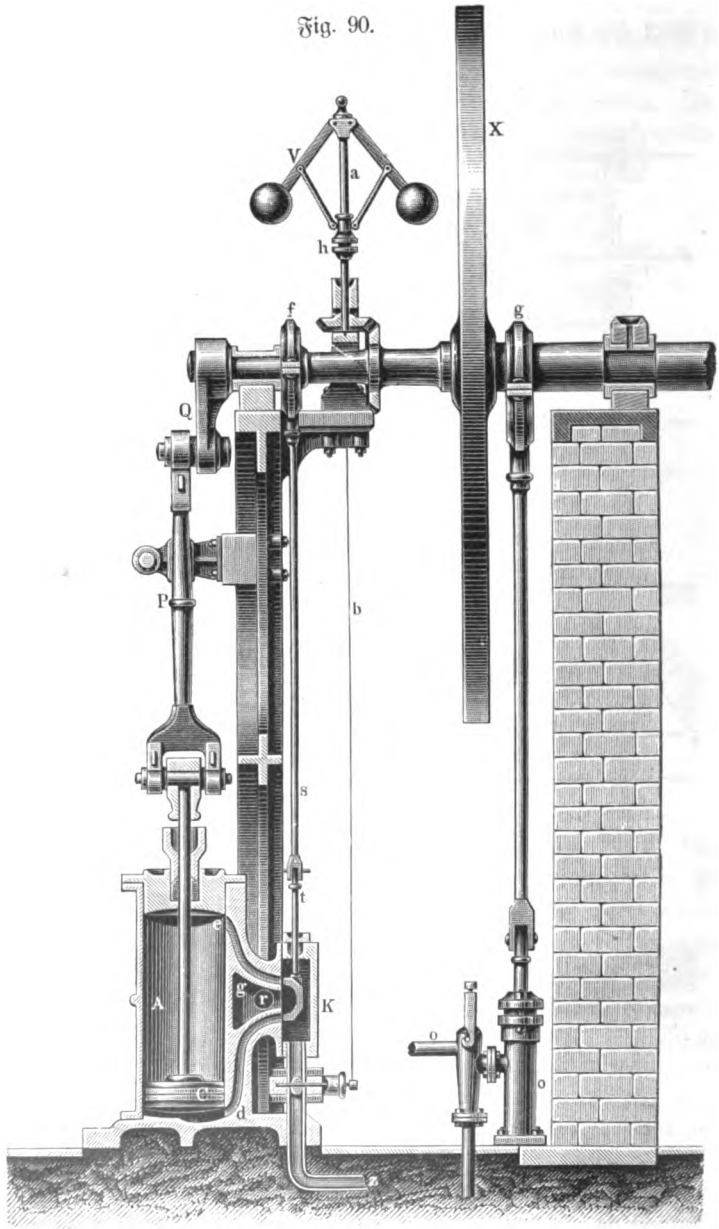
pumpe *m*, die das Waſſer in den Keſſel drückt. Der Verteilungsſchieber wird durch die exzentriſche Scheibe *e* vermittelſt der Stangen *ss* bewegt, und das Zuſtrömen des Dampfes wird durch den Zentrifugalregulator *f* reguliert.

§ 95. Watt benutzte zum Betrieb ſeiner Maſchine Dampf von nur 1 bis 2 Atmoſphären Spannung. Mit Hilfe des Kondenſators wurde

Digitized by Google

der Dampfdruck hinter dem Kolben faſt ganz vernichtet, ſo daß bei der Bewegung des Kolbens annähernd der geſamte Dampfdruck zur Geltung kam. Der Bewegung des Kolbens wirkte nur ein Dampfdruck entgegen, welcher

Fig. 90.



Hochdruckmaſchine.

Digitized by Google

der im Kondensator herrschenden Temperatur entspricht. Wenn man diese Temperatur kennt, so kann man den entsprechenden Druck aus der Tabelle auf S. 87 entnehmen. Eine solche Niederdruckmaschine hat verschiedene Vorzüge vor einer Maschine, die mit höherem Dampfdruck betrieben wird. Sie ist bedeutend haltbarer als eine solche, und die Gefahr einer Kesselexplosion ist so gut wie ausgeschlossen.

Allein bei geringem Druck muß der Kolben einen großen Querschnitt haben und es wird daher viel Dampf verbraucht. Außerdem muß die Maschine mit einem Kondensator und mit verschiedenen Pumpen versehen sein. Sie hat daher eine ziemlich komplizierte Einrichtung und beansprucht viel Platz.

Watt wußte wohl, daß man den Kondensator entbehren und den Dampf in die Luft gehen lassen kann. Dann muß aber der Dampfdruck bedeutend größer sein, da der Kolben in diesem Falle den Luftdruck überwinden muß. Eine solche Maschine arbeitet ohne Vakuum, d. h. ohne einen dampffreien Raum hinter dem Kolben.

In vielen Fällen verdient jedoch die einfachere Maschine mit hohem Dampfdruck, die Hochdruckmaschine, den Vorzug vor der komplizierteren Niederdruckmaschine.

Die Einrichtung der Hochdruckmaschine ist aus Fig. 90 ersichtlich. Das Dampfzuleitungsrohr und der Schieberkasten sind in der Figur nicht sichtbar, weil sie durch den Zylinder verdeckt sind. Die Schieberstange s und das Rohr z, durch welches der verbrauchte Dampf ausströmt, sind dagegen sichtbar, ebenso die exzentrische Scheibe und der Regulator. Das am oberen Ende der Kolbenstange angebrachte Querstück g wird durch die beiden Gleitstangen l geführt. Die Kolbenstange wirkt auf die Treibstange g, und diese auf die Kurbel Q.

§ 96. Die Arbeit, welche eine Dampfmaschine leisten kann, hängt offenbar von dem Druck ab, der auf den Kolben wirkt, und von der Geschwindigkeit, mit der sich dieser bewegt. Da die Wattsche Maschine an verschiedenen Orten zur Ausführung von Arbeiten verwendet wurde, die man früher von Pferden hatte verrichten lassen, wurde es gebräuchlich, die Leistungsfähigkeit der Dampfmaschine in „Pferdekräften“ auszudrücken. Ein englischer Brauer, der seinen Pferdegöpel durch eine Dampfmaschine ersetzen wollte, untersuchte, wie groß die Arbeit ist, die ein Pferd in einer Sekunde leisten kann. Er spannte ein kräftiges Pferd vor seinen Göpel, der eine Pumpe trieb, und ließ das Pferd angestrengt arbeiten. Er fand, daß es in einer Sekunde 470 Pfund Wasser einen Fuß hoch hob, daß es also in der Sekunde eine Arbeit von 470 Fußpfund leistet (I, § 226). Heutzutage versteht man unter einer Pferdekraft diejenige Kraft, welche in der Sekunde 75 Meterkilogramm Arbeit leistet.

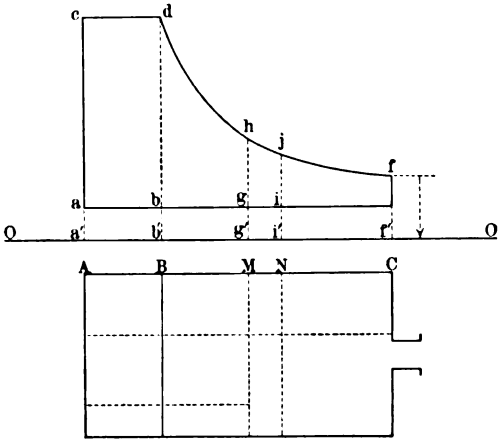
§ 97. James Watt hatte sich mit den Eigenschaften des Dampfes sehr vertraut gemacht. Dies zeigte sich sowohl in der Anwendung des

534374
Digitized by Google

Kondensators als auch darin, daß er den Dampf seine Energie durch Expansion an den Kolben abgeben ließ.

Watt verwendete zum Betrieb seiner Maschine, wie gesagt, nur einen Druck von etwa $1^1/_2$ Atmosphären. Wenn nun der Dampf in den Zylinder so lange einströmt, bis die Verbindung mit dem Kondensator hergestellt wird, so geht Energie verloren, weil der Dampf aus dem Zylinder austritt, ohne daß seine Spannkraft ausgenutzt worden ist. Um diesen Verlust zu vermeiden, richtete Watt den Schieber so ein, daß er den Dampf absperrte, noch ehe der Kolben am Ende des Zylinders angekommen war. Während sich der Kolben im Zylinder von *A* bis *B* (Fig. 91) bewegt, wirkt der volle Dampfdruck. Jetzt wird der Dampf abgesperrt und der Kolben wird nun von der Expansionskraft des Dampfes weitergetrieben. Während der Kolben den übrigen Teil des Zylinders durchläuft, wird die Expansionskraft dem Boyleschen Gesetz (vgl. § 81) entsprechend kleiner und kleiner. Der Augenblick, in welchem der Dampf abgesperrt wird und die Expansion anfängt, läßt sich so bestimmen, daß der Kolben das Ende des Zylinders mit einem kleinen Überdruck auf der einen Seite erreicht. Die durch die einzelne Kolbenbewegung geleistete Arbeit ist bei einer Expansionsmaschine natürlich geringer als bei einer Maschine ohne Expansion, da der Kolben während der Expansion durch einen stark abnehmenden Druck bewegt wird. In dem oberen Teil der Figur stellen die Linien *ac* und *bd* die Größe des Dampfdruckes vor, während sich der Kolben unter den vollen Dampfdruck von *A* bis *B* bewegt. Dann wird der Dampf abgesperrt und der Kolben geht unter Expansion, d. h. unter stark abnehmendem Druck von *B* bis *C*. Wenn man nun ebenso wie für die Punkte *A* und *B* für alle anderen Stellungen des Kolbens, z. B. die Punkte *M* und *N*, die Größe des Dampfdruckes durch Senkrechte, *gh* und *ij*, bezeichnet und die Endpunkte sämtlicher Senkrechten miteinander verbindet, so erhält man die krumme Linie *dhjf*, durch welche die Abnahme der Kraft, die auf den Kolben wirkt, veranschaulicht wird.

Fig. 91.



Dampfdruck im Zylinder.

Eine Expansionsmaschine leistet zwar weniger Arbeit als eine Maschine, die mit Dampf von gleicher Spannung ohne Expansion arbeitet, aber sie verbraucht anderseits bei gleicher Arbeitsleistung viel weniger Dampf als die

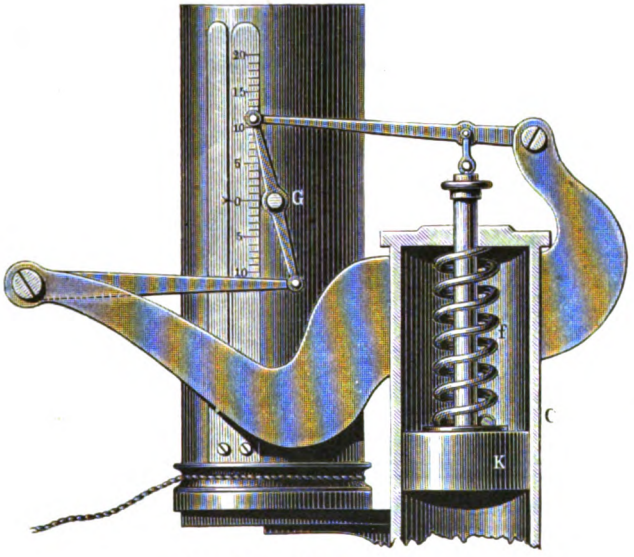
Digitized by Google

Maſchine, welche ohne Expanſion arbeitet. Daher benutzt man jetzt ausſchließlich Expanſionsmaſchinen.

§ 98. Um den Druck des Dampfes bei den verſchiedenen Stellungen des Kolbens zu meſſen, konſtruierte Watt den ſogenannten Indikator, der in ſeiner jetzt gebräuchlichen Form in Fig. 92 abgebildet iſt.

Ein kleiner Zylinder C mit dem Kolben K ſteht mit dem Zylinder der Maſchine durch ein Rohr in Verbindung, welches mit einem Hahn verſehen iſt. Der Kolben K hängt an der Spiralfeder f, und die Kolbenſtange ſteht

Fig. 92.



Der Wattſche Indikator.

mit einem Hebel in Verbindung, deſſen mittlerer Teil den Schreibſtift G trägt, der ſich nur aufwärts und abwärts bewegen kann und der die Oberfläche eines mit Papier belegten Zylinders berührt.

Solange der Hahn zwiſchen dem Indikator und dem Zylinder der Maſchine geſchloſſen iſt, wirkt kein Dampfdruck auf den Kolben K. Der Indikator befindet ſich in der abgebildeten Stellung, und der Stift G deutet auf den Nullpunkt der Teilung. Eine in der Figur nicht ſichtbare Feder hält den Zylinder, gegen den der Stift G drückt, in der abgebildeten Stellung feſt. Aber dieſer Zylinder kann durch die unten ſichtbare Schnur trotz der Feder um ſeine eigene Achſe gedreht werden. Die Schnur ſteht mit der Kolbenſtange der Maſchine ſo in Verbindung, daß der Zylinder beim Vorwärtsgehen des Kolbens gedreht und beim Zurückgehen des Kolbens durch die Feder in die urſprüngliche Lage zurückgedreht wird.

Iſt der Hahn geſchloſſen, ſo iſt K und alſo auch der Schreibſtift in Ruhe, und dieſer zeichnet auf das Papier eine horizontale Linie. Steht

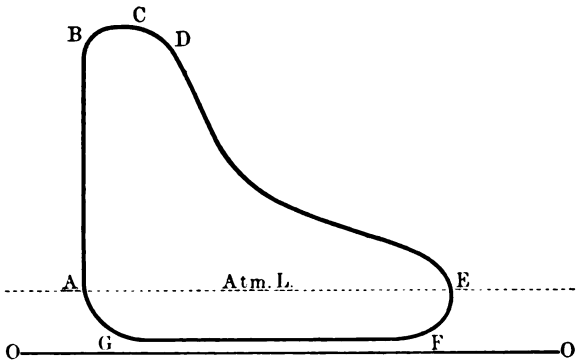
Digitized by Google

dagegen der Zylinder des Indikators mit dem Dampfzylinder der Maschine in Verbindung, so wird die Feder f zusammengedrückt und der Schreibstift G wird gehoben. Da die Feder dem Dampfdruck proportional zusammengedrückt wird, so ist die Verschiebung des Kolbens K und also auch die Verschiebung des Schreibstiftes ein Maß für die Größe des Dampfdruckes.

Wenn nun die Dampfmaschine mit Expansion arbeitet, so zeichnet G nicht mehr eine gerade Linie, da sich der Dampfdruck fortwährend ändert, sobald die Expansion beginnt (vgl. § 97). Der Stift zeichnet jetzt die in Fig. 93 abgebildete geschlossene krumme Linie. Die Figur gilt für eine Niederdruckmaschine.

Die punktierte horizontale Linie ist die Linie, die der Stift zeichnet, wenn kein Dampf in den Indikator eintritt. Diese Linie heißt die „atmosphärische Linie", weil der Druck unter dem Kolben der Atmosphärendruck ist. Mit dem Punkt A beginnt die Kolbenbewegung. Der Dampf wird zugelassen und der Stift G beschreibt die Linie AB. Eine kurze Zeit bleibt der Dampfdruck unverändert und G zeichnet die Linie BC (Dampflinie). Jetzt fängt der Schieber an, den Dampf abzusperren. Derselbe ist vollständig abgesperrt, wenn der Schreibstift den Punkt D erreicht.

Fig. 93.



Indikatordiagramm einer Niederdruckmaschine.

Während der Expansion beschreibt der Stift die Linie von D bis E. Jetzt wird durch den Verteilungsschieber die Verbindung mit dem Kondensator hergestellt und G beschreibt die Linie EF (Ausströmungslinie), während der Dampf aus dem Zylinder ausströmt. Der Kolben geht jetzt zurück und der Druck ist (da es sich um eine Maschine mit Kondensator handelt) kleiner als der Atmosphärendruck. Die Größe desselben hängt von der Temperatur im Kondensator ab (§ 95), bleibt aber unverändert bis die Verbindung mit diesem durch den Schieber unterbrochen wird. Dies findet im Punkte G statt. Jetzt muß der Kolben den Rest des Dampfes im Zylinder zusammendrücken, und G beschreibt die Linie GA. Dann tritt wieder der Dampf in den Zylinder ein, es beginnt ein neuer Kolbenschlag und der Stift G beschreibt von neuem dieselbe Figur, vorausgesetzt, daß sich der Dampfdruck im Kessel nicht ändert.

§ 99. Die krumme Linie $ABCDEFG$ (Fig. 93), das Indikatordiagramm, gibt zunächst die Größe des Dampfdruckes bei den verschiedenen

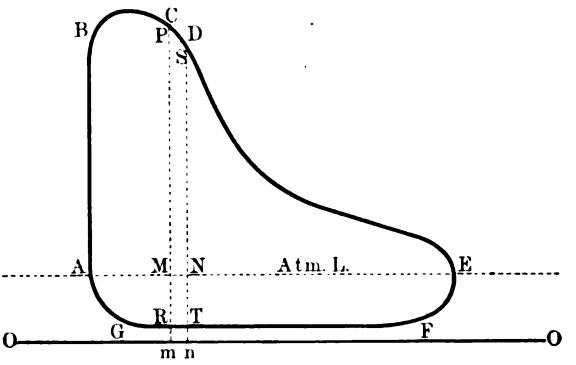
Digitized by Google

Stellungen des Kolbens an. Wenn man weiß, daß der Abstand von der Linie OO bis zur atmosphärischen Linie einen Druck von einem Kilogramm auf ein Quadratzentimeter bedeutet, so kann man die Größe des Dampfdruckes für einen beliebigen Punkt des Diagramms bestimmen, indem man den Abstand des betreffenden Punktes von OO ermittelt.

Das Diagramm gibt aber noch mehr an als die Größe des Dampfdruckes. Die vom Diagramm eingeschlossene Fläche ist nämlich ein Maß für die Größe der Arbeit, die der Dampf, der auf der einen Seite des Kolbens wirkt, an diesen während eines Kolbenschlages abgibt. Man muß dabei berücksichtigen, daß der Kolben beim Zurückgehen einen Gegendruck zu überwinden hat, da der Kondensator den Dampfdruck nicht vollständig vernichtet.

Betrachtet man den Kolben in einer seiner Stellungen, z. B. der dem Punkt m entsprechenden, so wirkt auf den Kolben in der Richtung der Bewegung der Druck mP (Fig. 94). Aber auf der anderen Seite ist ein Gegendruck mR, der dem Dampfdruck im Kondensator entspricht. Die bewegende Kraft bei der Stellung m ist also $mP - mR = RP$.

Fig. 94.



Berechnung des Indikatordiagramms.

Wenn sich nun der Kolben eine kleine Strecke, z. B. bis m weiterbewegt hat, so ist die bewegende Kraft $nS - nT = TS$. Wenn M und N hinreichend nahe beieinander liegen, so sind RP und TS gleich groß und die Fläche $RPST$ ist ein Rechteck, dessen Größe gleich dem Produkt aus RP und mn ist.

Die Arbeit, welche der Dampf auf den Kolben ausübt, während sich dieser von m bis n bewegt, ist aber gleich dem Produkt aus dem Druck und dem zurückgelegten Weg. Nun ist der (bewegende) Druck gleich RP, und der Weg mn. Also wird die Arbeit durch das Produkt $RP \times mn$ ausgedrückt und das Rechteck $RPST$ ist das Maß für die Arbeit, welche der Kolben vom Dampf erhält, während er sich von m bis n bewegt.

Teilt man nun den ganzen Wege, den der Kolben von A bis E zurücklegt, in kleine Teile wie MN und zeichnet die entsprechenden Rechtecke, so sieht man leicht ein, daß die Summe dieser Rechtecke, d. h. der Flächeninhalt des Diagramms, das Maß für die Arbeit ist, die der Kolben erhält, während er aus der einen äußersten Stellung in die andere übergeht.

§ 100. Das Diagramm einer Hochdruckmaschine unterscheidet sich vom Diagramm einer Niederdruckmaschine hauptsächlich dadurch, daß es ganz ober-

Digitized by Google

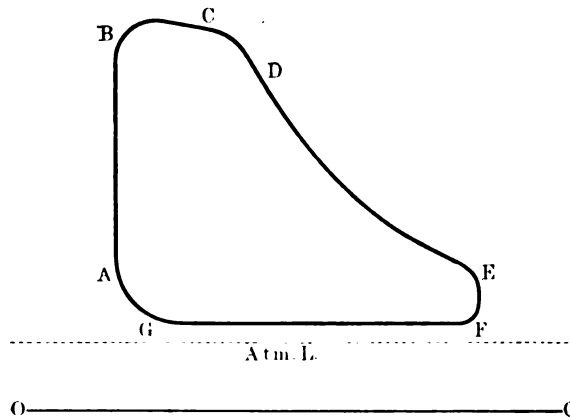
halb der atmosphärischen Linie liegt (Fig. 95), weil der Gegendruck in einer solchen Maschine immer größer als der Atmosphärendruck ist.

Drückt man den Dampfdruck in Kilogrammen und die Kolbenbewegung in Metern aus, so erhält man den Wert der Arbeit in Meterkilogrammen.

Die wirkliche Arbeitsleistung, die sogenannte effektive Arbeit der Maschine ist jedoch geringer als die durch den Indikator ermittelte, die als indizierte Arbeit bezeichnet wird. Ein Teil dieser Arbeit geht nämlich durch die Reibung zwischen den Maschinenteilen verloren.

Aber nicht nur die Größe, sondern auch die Form des Diagramms ist von Bedeutung. Aus dieser kann man nämlich ersehen, ob der Schieber und der Kolben dicht sind und ob der Schieber sich in der richtigen Stellung befindet. Wenn das Diagramm eine abnorme Gestalt hat, so ist dies ein Zeichen, daß die Maschine Fehler hat, die beseitigt werden müssen. Die Prüfung vermittelst des Indikators spielt daher bei der Einstellung und Kontrollierung des Verteilungsschiebers eine wichtige Rolle.

Fig. 95.



Indikatordiagramm einer Hochdruckmaschine.

§ 101. Die Dampfmaschine, wie sie heutzutage in Gebrauch ist, ist im wesentlichen noch die Wattsche Maschine mit Expansionsschieber, Kurbel, Schwungrad und Regulator. Selbstverständlich ist die Maschine mit Rücksicht auf die verschiedene Verwendung derselben in ihren einzelnen Teilen abgeändert und verbessert worden, aber im großen ganzen ist sie noch dieselbe. Der Kondensator findet allerdings nur noch bei sehr großen stehenden Maschinen, aber allgemein bei den Schiffsmaschinen Verwendung.

So war es die geniale und unermüdliche Arbeit dieses Mannes, die die Dampfkraft zu einem willigen Diener des Menschen machte. Die Arbeit Watts war von grundlegender Bedeutung. Nach ihm kam eine Reihe von Männern, die auf der von ihm geschaffenen Grundlage weiterbauten.

Welche vielseitige Anwendung die Wattsche Maschine finden sollte, davon hatte man anfangs kaum eine Ahnung. Sie ist eine unerschöpfliche Energiequelle, und sobald die Energie in unbegrenzter Menge zur Verfügung steht, kann es nicht ausbleiben, daß für die Tätigkeit des Menschen neue Gebiete erschlossen werden, was auf die Kulturentwickelung einen fördernden Einfluß ausüben muß.

Digitized by Google

Während des Zusammenarbeitens mit Boulton besorgte dieser die geschäftlichen Angelegenheiten, so daß sich Watt in Ruhe seinen wissenschaftlichen Arbeiten widmen konnte. Watt kaufte 1790 ein Landgut in Heathfield bei Birmingham, und sein Haus bildete den Sammelpunkt für einen großen Kreis von Freunden aus nah und fern. Watt war ein gesuchter Ratgeber, da er in hohem Grade die Gabe besaß, sich in den Gedankengang eines anderen zu versetzen und die Lösung schwieriger Fragen zu finden. Seine wissenschaftliche Tätigkeit führte ihn auch auf andere Gebiete der Physik, auf denen wir ihm später begegnen werden.

Er starb 1819. In der Westminsterabtei wurde ihm ein Denkmal errichtet, dessen Inschrift (in deutscher Übersetzung) den folgenden Wortlaut hat: „Nicht um einen Namen zu verewigen, der leben muß, solange die friedlichen Künste blühen, sondern um zu zeigen, daß die Menschen gelernt haben, diejenigen zu ehren, die am meisten ihre Dankbarkeit verdienen, errichtete der König, seine Minister und viele Edelleute und Bürgerliche des Königreiches dieses Denkmal James Watt, der eine durch wissenschaftliche Forschung geübte Begabung auf die Verbesserung der Dampfmaschine verwendete, die Hilfsquellen seines Landes bereicherte, die Macht des Menschen erhöhte und sich zu einer hervorragenden Stellung unter den berühmtesten Gelehrten und den wirklichen Wohltätern der Welt emporschwang. Geboren in Greenock 1736, gestorben in Heathfield in Staffordshire 1819."

§ 102. Schon lange bevor Watt seine Verbesserungen der Dampfmaschine ausgeführt hatte, waren verschiedene Versuche gemacht worden, den Dampf als Triebkraft für Schiffe zu benutzen. Die Arbeiten Papins über diesen Gegenstand waren nicht weit über das Stadium der Projekte hinausgekommen. Allein nachdem die Newcomensche Maschine bekannt geworden war, wurde auch die Lösung dieses Problems von verschiedenen Seiten in Angriff genommen. Jonathan Hulls nahm 1736 in England ein Patent auf ein Raddampfboot, dessen Achse durch eine Newcomensche Maschine vermittelst eines Riemens in Bewegung gesetzt wurde. Allein das Rad bewegte sich zu unregelmäßig und die Maschine verbrauchte zu viel Kohlen, als daß das Boot irgendwelche praktische Bedeutung hätte gewinnen können. Die Idee, die Maschine ein Schaufelrad treiben zu lassen, war übrigens keineswegs neu. Auf alten römischen Medaillen aus der Zeit vor Christi Geburt finden sich Abbildungen von Kriegsfahrzeugen mit Schaufelrädern, und in China sind Boote mit vier Schaufelrädern seit den ältesten historischen Zeiten in Gebrauch gewesen.

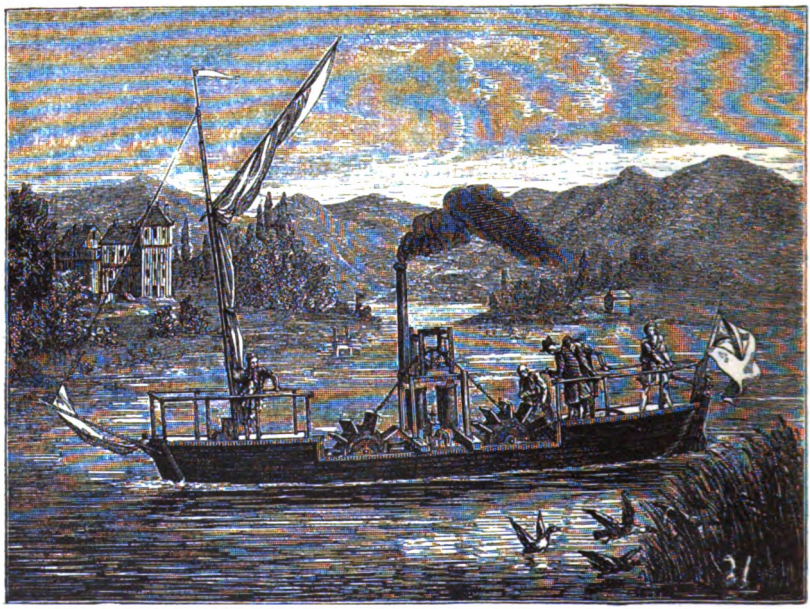
Das Schaufelrad kann als eine Reihe von Ruderblättern betrachtet werden, die nach und nach gegen das Wasser gedrückt werden, und es hat den großen Vorzug vor einer Anzahl einzelner Ruder, daß es durch eine Achse bewegt werden kann. Hierdurch wird es ermöglicht, zum Fortbewegen eines Schiffes bei Windstille andere Triebkräfte als die menschliche Muskelkraft anzuwenden. Im Mittelalter und noch im 18. Jahrhundert wurden die Verbrecher zur „Galeere" verurteilt, d. h. sie mußten auf den Kriegsschiffen als

Digitized by Google

Ruderer Dienſte leiſten. Zur ſicheren Fortbewegung eines einigermaßen großen Schiffes war aber eine Beſatzung von mehreren Hundert Perſonen erforderlich. Man ſuchte daher Zugtiere zu verwenden, die in einem Pferdegöpel gingen, durch den das Schaufelrad in Bewegung geſetzt wurde. Dies Mittel war aber natürlich nur bei der Fahrt in ruhigem Waſſer anwendbar, da bei hoher See die Arbeit der Tiere durch die Bewegungen des Schiffes unmöglich gemacht wurde.

Daß es ſowohl für die Kriegsflotte, als auch für die Handelsflotte ſehr weſentlich iſt, eine vom Wind unabhängige Triebkraft zu beſitzen, iſt leicht

Fig. 96.



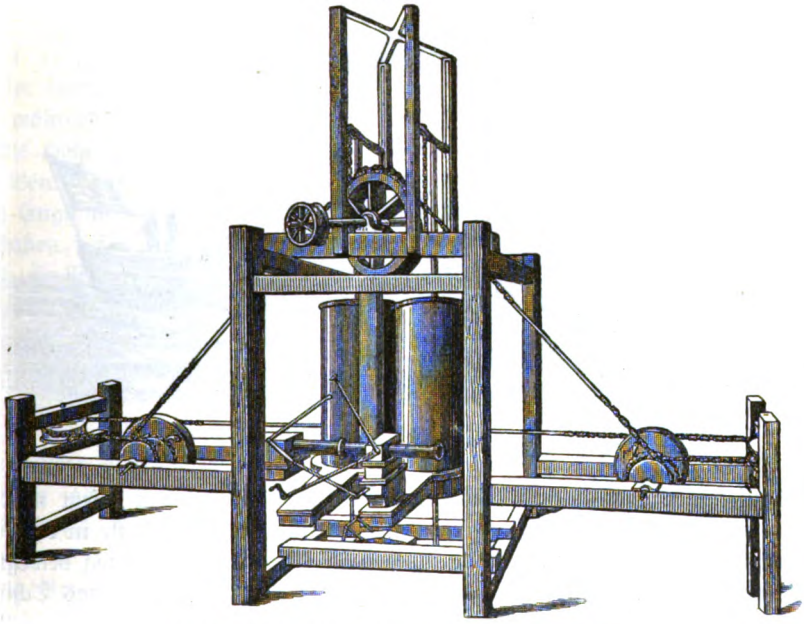
Symingtons Dampfboot.

einzuſehen. Solange der Verkehr zur See ausſchließlich vom Wind abhängig iſt, läßt ſich die Dauer der Seereiſen nicht berechnen, und ſelbſt auf kürzeren Strecken iſt bei ungünſtigem Wind der Verkehr unterbrochen. Die franzöſiſche Akademie ſetzte einen Preis aus für eine Unterſuchung darüber, welche Mittel man habe, um die Schiffe ohne Hilfe des Windes zu bewegen, und es iſt charakteriſtiſch für den Zuſtand der Dampfmaſchine in der erſten Hälfte des 18. Jahrhunderts, wie in zwei der Akademie eingereichten Abhandlungen dieſe Maſchine beurteilt wurde. Der Mathematiker Daniel Bernoulli (1700 bis 1782) verwarf den Dampf als Triebkraft für Schiffe, weil die Newcomenſche Maſchine nicht kräftig genug wirkte, um ein größeres Schiff hinreichend ſchnell fortzubewegen. Bernoulli hatte inſofern recht, als die Dampfmaſchinen,

Digitized by Google

über die man damals verfügte, allerdings unbrauchbar waren. Aber der Verfasser der anderen Abhandlung, der Abt Gauthier, hatte ebenfalls recht, wenn er behauptete, die Dampfmaschine sei das einzige bekannte Mittel, welches man mit Aussicht auf Erfolg zum Bewegen der Schiffe verwenden könne. Es gelang ihm auch nachzuweisen, daß in dem vorliegenden Fall selbst die wenig kräftigen atmosphärischen Maschinen große Vorzüge vor der menschlichen Muskelkraft hatten. Eine Galeere mit 26 Rudern auf jeder Seite, deren jedes fünf Mann erfordert, muß 520 Ruderer, nämlich zwei Abteilungen von je 260 Mann haben. Die Ausgaben für eine solche Besatzung waren

Fig. 97.



Die Maschine von Symingtons Dampfboot.

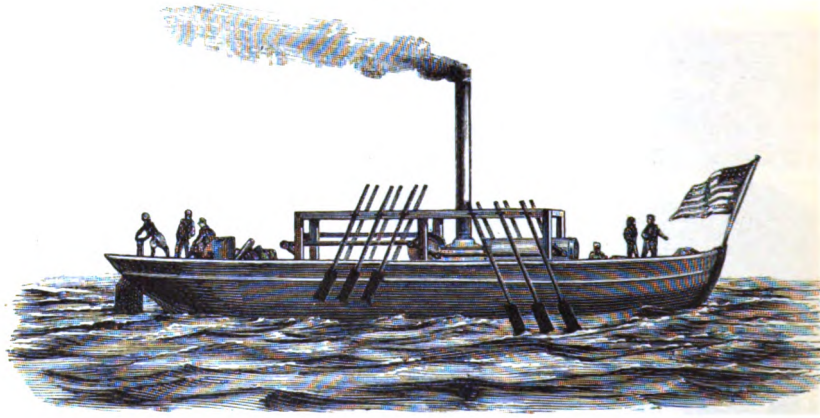
größer als die Ausgaben für Kohlen und Maschinen, und 520 Mann erforderten mehr Platz als die Kohlen und die Maschinen. Gauthier kam zu dem Resultat, daß als Triebkraft für Schiffe nur die Dampfkraft in Betracht kommen könne.

§ 103. Die Behauptung Gauthiers fand durch die Wattsche Maschine ihre Bestätigung. Allein erst nach vielen vergeblichen Versuchen gelang es, die Wattsche Maschine in einer soliden und praktischen Weise mit dem Schaufelrad in Verbindung zu bringen. Eine Anzahl Franzosen kam trotz langwieriger und angestrengter Tätigkeit nicht über das Stadium der Versuche hinaus, und ähnlich ging es in Schottland. Hier baute ein junger Ingenieur, William Symington, ein Dampfboot (Fig. 96), dessen Maschine in Fig. 97

Digitized by Google

abgebildet ist. Die Maschine hat zwei Zylinder, die auf dem Deck des Schiffes stehen. Die Kolbenstangen bewegen je ein Querstück in einem Rahmen aufwärts und abwärts, und diese Querstücke ziehen an den Enden einer Kette, die in der einen Rinne einer doppelten Rolle liegt. In der anderen Rinne der Rolle läuft eine Kette ohne Ende, die außerdem über zwei andere Rollen läuft, von denen sich die eine vor und die andere hinter den Zylindern befindet. Diese Rollen sitzen lose auf den Achsen zweier Schaufelräder (siehe Fig. 96 und 97), aber durch Sperrhaken wird bewirkt, daß die Rollen ihre Bewegung in der einen Richtung auf die Achsen und also auch auf die

Fig. 98.



John Fitchs Ruderboot.

Schaufelräder übertragen. Wenn nun die Maschine in Gang gesetzt wird, so werden die Achsen in Drehung versetzt, wenn sich die Doppelrolle in der einen Richtung bewegt. Wenn sie sich dagegen in der anderen Richtung bewegt, so wirken die Sperrhaken nicht, aber die Achsen drehen sich, sobald das Schiff in Bewegung ist, trotzdem infolge der Trägheit weiter. In einem kleinen Boot, welches keine große Triebkraft erfordert, konnte man diese komplizierte Maschine verwenden, aber für große Schiffe eignete sie sich nicht, da die Ketten und die Achsen durch den wechselnden Druck zu schnell abgenutzt wurden.

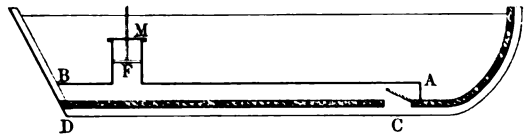
§ 104. Es waren schließlich einige Männer der Neuen Welt, denen die Lösung des Problems gelingen sollte. Erst suchte John Fitch, ein Uhrmacher in Philadelphia, ein Boot durch Ruder zu treiben, die durch eine doppeltwirkende Maschine in Bewegung gesetzt wurden. Mit einem solchen Boot (Fig. 98) wurden 1789 auf dem Delaware Probefahrten unternommen. Das Boot hatte sechs Paar Ruder, und es bewegte sich mit einer Geschwindigkeit von acht englischen Meilen in der Stunde. Fitch erkannte jedoch bald, daß das Boot erhebliche Mängel hatte. Er wollte daher seine Versuche fortsetzen, und da er in Amerika keine Unterstützung fand, reiste er 1792 nach Europa. In Paris fand er durch Vermittelung Brissots Gelegenheit, die Mitglieder

Digitized by Google

des Konvents für seine Projekte zu interessieren. Allein bald nachher verlor Brissot seinen Einfluß (er wurde später zusammen mit den Girondisten guillotiniert) und Fitch reiste, ohne etwas erreicht zu haben, nach Amerika zurück. In Verzweiflung über seine hilflose Lage machte er seinem Leben durch Ertränken ein Ende.

§ 105. In einer ganz anderen Weise suchte Rumsey das Problem der Schiffsbewegung zu lösen. Er ließ Wasser in das Schiff pumpen und durch eine starke Druckpumpe am hinteren Ende des Schiffes wieder hinausdrücken. Das Schiff bewegt sich infolgedessen vorwärts (vgl. § 56). Bei *C* (Fig. 99) tritt das Wasser durch das Ventil *A* ein, während ein Kolben *F* in die Höhe geht, und bei *B* wird es beim Niedergehen des Kolbens durch ein Ventil, welches sich nach außen öffnet, hinausgedrückt. Rumsey, der nach England gereist war, starb, ohne die Ausführung seines Planes erlebt zu haben. Dennoch ist seine Arbeit indirekt von großem Nutzen gewesen, da durch sie Robert Fulton zu seinen Arbeiten über die Dampfschiffahrt angeregt wurde.

Fig. 99.



Rumseys Boot.

Fig. 100.

Robert Fulton.

§ 106. Robert Fulton war 1765 zu Little Britain in Pennsylvanien als Sohn armer aus Irland stammender Eltern geboren. Zuerst war er eine Zeitlang bei einem Goldschmied in der Lehre. Er gab jedoch das Handwerk auf, um sich seiner Neigung folgend als Maler auszubilden. Mit 17 Jahren war er in der Lage, sich selbst und seine Mutter, die Witwe war, mit seiner Kunst zu ernähren, ja er verdiente soviel, daß er seiner Mutter ein kleines Landgut kaufen konnte. Im Jahre 1786 begab er sich, mit guten Empfehlungen versehen, nach England, um sich hier weiter auszubilden. Als er jedoch die Überzeugung gewann, daß er mit der Malerei nicht viel erreichen würde, gab er die Kunst auf und wandte sich der Technik, speziell dem Maschinenbaufach, zu.

Im Jahre 1788 traf er in London mit Rumsey zusammen. Dieser veranlaßte ihn, sich an den Arbeiten über die Anwendung der Dampfkraft zum Fortbewegen der Schiffe zu beteiligen. Fulton machte den Vorschlag, die

Digitized by Google

von Rumsey in Aussicht genommenen Pumpen durch Schaufelräder zu ersetzen. Nach dem bald darauf erfolgten Tode Rumseys versuchte er, Kapitalisten für seine Pläne zu interessieren, was ihm jedoch nicht gelang. In den Jahren 1790 bis 1804 hielt er sich teils in England und teils in Frankreich auf und legte den Regierungen dieser beiden Länder Pläne über Kanalanlagen, Seeminen und Taucherboote vor. Die Minen nannte er Torpedos. Sie bestanden aus kupfernen Kasten, die mit Pulver gefüllt waren, und die er mit Hilfe seines Taucherbootes Nautilus an jeder beliebigen Stelle anbringen konnte.

Napoleon brachte den Erfindungen Fultons eine Zeitlang großes Interesse entgegen. Als jedoch einige Versuche, englische Kriegsschiffe in die Luft zu sprengen, mißlangen, ließ er die Angelegenheit fallen.

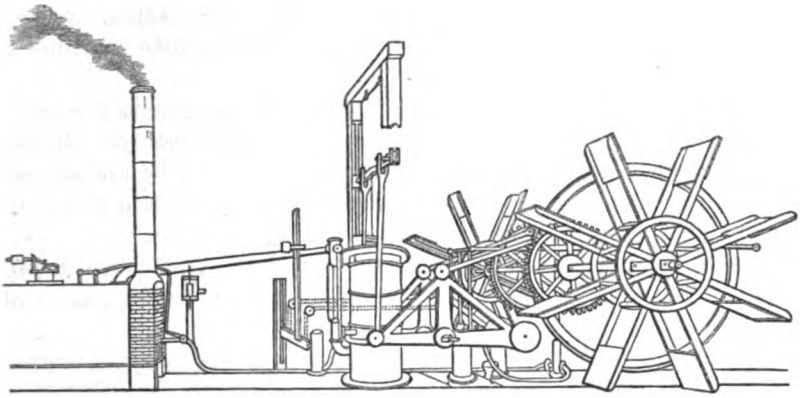
§ 107. Übrigens hatte Fulton trotz seiner zahlreichen sonstigen Projekte das Dampfschiff nicht vergessen. Im Jahre 1801 reiste er nach Schottland, um ein Dampfboot kennen zu lernen, welches der bereits erwähnte Symington erbaut hatte, und welches eine doppeltwirkende Maschine besaß. Symington beschreibt Fultons Besuch in folgender Weise: „Als ich mit meinen Versuchen (über das Dampfschiff) beschäftigt war, besuchte mich Herr Fulton, der mir erzählte, er sei in Nordamerika zu Hause und beabsichtige, nach einigen Monaten dorthin zurückzukehren. Da er aber von unseren Versuchen mit dem Dampfboot gehört habe, sei es ihm unmöglich, das Land zu verlassen, ohne erst mit mir gesprochen und womöglich das Boot gesehen und Aufklärung über dasselbe, wenn ich sie ihm geben wolle, bekommen zu haben. Denn wenn die Erfindung für das britische Reich große Bedeutung habe, so würde sie eine noch viel größere Bedeutung für Amerika mit seinen vielen schiffbaren Flüssen haben. Um seinem Wunsche entgegenzukommen, ließ ich heizen und fuhr mit ihm eine Strecke von vier (englischen) Meilen auf dem Kanal (dem Forth-Clydekanal) hin und zurück. Wir brauchten zu der Fahrt 1 Stunde und 20 Minuten, hatten also eine Geschwindigkeit von sechs Meilen in der Stunde. Fulton war sehr überrascht. Während der Fahrt bat er um die Erlaubnis, sich einige Notizen über das Dampfschiff machen zu dürfen. Ich hatte nichts dagegen einzuwenden, da ich wünschte, daß die Sache in möglichst weiten Kreisen bekannt werde, und da ich durch mein Patent in England geschützt war. In Amerika konnte ich allerdings kein Privilegium bekommen. Er machte sich seine Aufzeichnungen und ich gab ihm auf verschiedene Fragen über die Maschine unumwunden Auskunft."

Fulton hatte auch wirklich die Absicht, nach Amerika zurückzukehren. Die französische Regierung hatte es abgelehnt, seine Versuche zu unterstützen, und er hatte daher keine Veranlassung, länger in Paris zu bleiben. Er begab sich daher zum amerikanischen Konsul Robert Livingstone, um sich von diesem zu verabschieden. Dieser hatte sich früher selbst mit der Konstruktion des Dampfschiffes beschäftigt, und als er von Fultons Plänen hörte, überredete er diesen, in Paris zu bleiben. Livingstone war bereit, die zur Ausführung eines entscheidenden Versuches mit dem Dampfschiff erforderlichen

Digitized by Google

Mittel zur Verfügung zu stellen. Fulton studierte nun alle früheren Versuche und kam dabei merkwürdigerweise zu dem Resultate, daß Fitchs Ruderſyſtem das beſte ſei. Allein es zeigte ſich, daß dieſer Plan im großen nicht ausführbar ſei, und er baute daher einen Raddampfer, der ſeine erſte Fahrt im Jahre 1803 machte. Das Schiff war 100 Fuß lang und 10 Fuß breit. Die Sache erregte großes Aufſehen, und ein Teil der Mitglieder der Akademie beteiligte ſich an der Probefahrt. Fulton erklärte ſich bereit, ſeine Pläne gegen Zahlung einer angemeſſenen Summe der Regierung zu überlaſſen, doch wurde ſein Anerbieten abgelehnt. Napoleon, der von Projekten-

Fig. 101.



Die Dampfmaſchine des „Clermont".

machern ſehr geplagt wurde, ließ die Sache nicht einmal näher prüfen. Hätte er das Anerbieten Fultons angenommen, ſo hätte ſein Lebenslauf vielleicht nicht ſeinen Abſchluß auf St. Helena gefunden.

§ 108. Inzwiſchen ſandte Livingſtone einen Bericht über den günſtigen Ausfall der Verſuche an den Kongreß und erwirkte die Verlängerung eines Patentes, welches er früher genommen hatte, um 20 Jahre von 1803 ab.

Eine kräftige doppeltwirkende Maſchine wurde bei Boulton und Watt beſtellt und, als ſie fertig war, nach Newyork geſandt. Zwei Maſchinenarbeiter aus Soho reiſten nach Amerika, um die Aufſtellung der Maſchine zu beſorgen.

Im Sommer 1807 hatte Fulton die Maſchine in ein ſtarkes Boot von 160 Fuß Länge und 16 Fuß Breite eingeſetzt. Die Maſchine iſt in Fig. 101 abgebildet. Fulton hatte ſelbſt ſämtliche Zeichnungen für die Konſtruktion derſelben geliefert. Die Maſchine beſitzt zwei Zylinder und jede der beiden Kolbenſtangen wirkt an einem beſonderen Balancier, der neben dem Zylinder angebracht iſt. Die Bewegung des Balanciers wird vermittelſt einer Treibſtange und einer Kurbel auf die Radachſe übertragen. Ein beſonderer Vorzug dieſer Maſchine lag in der einfachen und ſicheren Verbindung derſelben mit der Radachſe. Jeder der beiden Kolben half der Kurbel

Digitized by Google

des anderen über den toten Punkt hinweg, so daß die Maschine leicht in Gang zu setzen war.

Am 11. August 1807 unternahm der „Clermont“ — so war das Schiff nach dem Landsitz Livingstones benannt worden — seine berühmte Fahrt auf dem Hudson von Newyork nach Albany. Die Entfernung von 36 geographischen Meilen wurde in 32 Stunden zurückgelegt. Seitdem verkehrte der Dampfer regelmäßig zwischen den beiden genannten Städten.

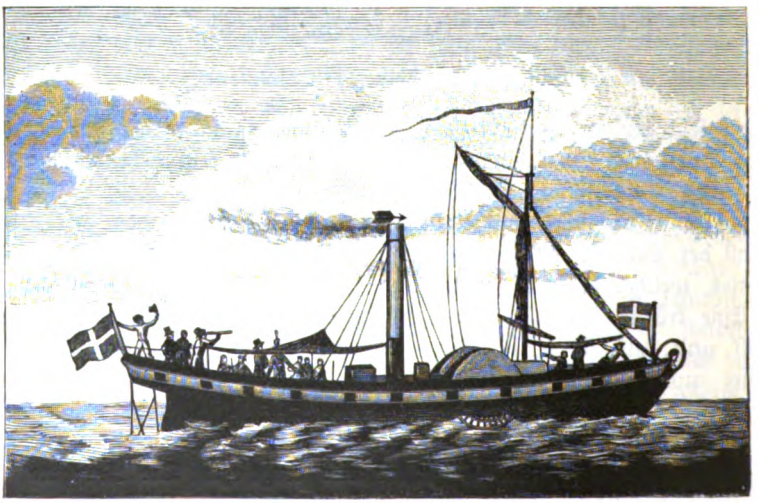
Hiermit war das Eis für die Dampfschiffahrt gebrochen, und die Menschheit war im Besitze eines der ausgezeichnetsten Mittel für die Entwickelung der Kultur im 19. Jahrhundert.

Fulton hat nur die Anfänge der großartigen Entwickelung, welche die Dampfschiffahrt alsbald nahm, erlebt. Er starb bereits 1815 im Alter von kaum 50 Jahren.

In Europa verkehrte das erste Dampfboot in regelmäßiger Fahrt im Jahre 1812 auf dem Clyde. Der Erbauer des Schiffes war ein Bekannter Fultons, der schottische Mechaniker Henry Bell. Die erste größere Fahrt auf offener See wurde 1816 vom Kapitän Andriel auf dem Kanal (von Dungeneß nach Havre) unternommen.

Auf dem Rhein und der Elbe fuhren die ersten (englischen) Dampfer im Jahre 1818. Im folgenden Jahre verkehrte der Postdampfer „Caledonia“

Fig. 102.



Der dänische Postdampfer „Caledonia“.

zwischen Kopenhagen und Kiel. Die erste Fahrt über den Atlantischen Ozean unternahm 1818 der Dampfer „Savannah“. Er brauchte von Savannah bis Liverpool 26 Tage, war aber nur 18 Tage unter Dampf, die übrigen 8 Tage unter Segel gefahren. Eine regelmäßige Dampferverbindung zwischen der Alten und der Neuen Welt gab es jedoch erst seit 1838.

Digitized by Google

§ 109. Den wichtigsten Fortschritt in der Dampfschiffahrt nach der Zeit Fultons bildet die Einführung der Schiffsschraube anstatt des Rades.

Bereits Daniel Bernoulli (§ 102) hatte vorgeschlagen, die Schraube zur Fortbewegung der Schiffe zu benutzen. Wenn eine Schraube, die sich in einer festsitzenden Schraubenmutter bewegt, eine Umdrehung macht, so verschiebt sie sich um eine Strecke, die gleich der Höhe eines Schraubenganges ist (vergl. I., § 135, Beispiel 5). Ist die Schraubenmutter nur teilweise fest, so daß sie einen Teil einer Umdrehung macht, während die Schraube eine volle Umdrehung macht, so ist die Verschiebung der Schraube kleiner als die Höhe des Schraubenganges. Aber sobald die Schraubenmutter die Bewegung der Schraube nicht vollständig mitmacht, hat die Bewegung der letzteren eine Verschiebung in der Richtung der Schraubenachse zur Folge. Bernoulli zog hieraus den Schluß, daß eine unterhalb des Wasserspiegels am Hintersteven eines Schiffes angebrachte Schraube durch ihre Drehung das Schiff in Bewegung setzen müsse. Das die Schraube umgebende Wasser muß nämlich als eine teilweise feste (oder teilweise bewegliche) Schraubenmutter betrachtet werden. Das Wasser setzt der Bewegung der Schraube Widerstand entgegen und nimmt nicht die Geschwindigkeit der Schraube an. Infolgedessen bewegt sich die Schraube und mit ihr das Schiff fort. — Der Vorschlag Bernoullis hatte zunächst keine praktische Bedeutung, da man keine Triebkraft hatte, vermittelst deren man die Schraube in eine hinreichend schnelle Bewegung hätte setzen können.

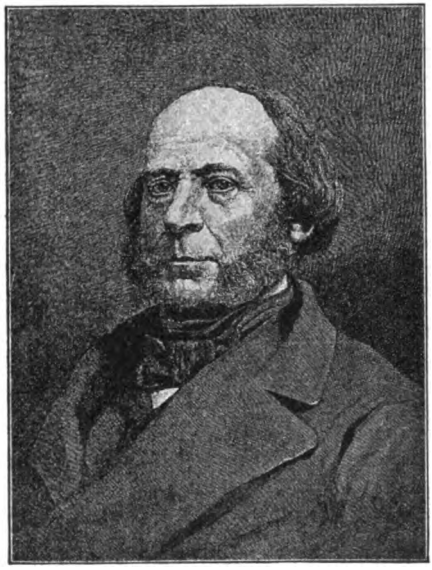
Erst seitdem die Wattsche Dampfmaschine existierte, konnte die Schraube als Mittel zum Fortbewegen der Schiffe in Frage kommen. Bereits am Anfang des 19. Jahrhunderts wurden verschiedene Versuche gemacht, die Schaufelräder der Dampfschiffe durch die Schraube zu ersetzen, aber erst dem Schweden John Ericsson gelang es, die praktischen Schwierigkeiten zu überwinden, so daß er mit Recht als Erfinder der Schiffsschraube oder des Propellers bezeichnet wird.

§ 110. John Ericsson war 1803 in Langbanshyttan in Wermland geboren, wo sein Vater Bergmann war. Er erhielt zusammen mit seinem ein Jahr älteren Bruder Niels Ericsson seine Ausbildung beim Ingenieurkorps, nahm aber bereits 1826 seinen Abschied und begab sich nach England. Hier machte er sich bald durch seinen Dampfwagen (§ 117) bekannt, und 1833 trat er mit seiner sogenannten Heißluftmaschine (kalorische Maschine) an die Öffentlichkeit. Sie beruht darauf, daß eine abgesperrte Luftmenge beim Erhitzen einen hinreichenden Druck ausübt, um, ähnlich wie der Dampf, einen Kolben bewegen zu können. Ericsson wollte durch diese Maschine die Wärme besser ausnutzen, als es bei einer Hochdruckmaschine möglich ist, bei der der verbrauchte Dampf mit seiner großen Verdampfungswärme in die Luft entweicht, so daß die Wärme desselben verloren geht. Wenn die Triebkraft durch erhitzte Luft statt durch Dampf erzeugt wird, so wird die Wärme erspart, die zum Verdampfen des Wassers verbraucht wird. — Es ist jedoch nur ein verhältnismäßig geringer Druck, der in einer abgesperrten Luftmenge

Digitized by Google

erzeugt wird, selbst wenn sie sehr stark erhitzt wird. Während der Wasserdampf bei 150° C eine Spannung von fünf Atmosphären besitzt, übt die Luft erst bei 273° C einen Druck von zwei Atmosphären aus (vergl. § 34). Da man nun nicht über eine Temperatur von 200 bis 300° hinausgehen kann, ohne die Maschinenteile zu beschädigen, muß der Kolben der Heißluftmaschine viel größer sein als der Kolben der Dampfmaschine. Durch diesen Umstand wurde die Anwendung der Heißluftmaschine in der Großindustrie in hohem Grade erschwert. Dagegen fand sie in der Kleinindustrie, wo nur eine geringe Triebkraft erforderlich ist, in den fünfziger Jahren große Verbreitung. Später wurde sie durch die Gasmaschinen und die Petroleummaschinen verdrängt. Ericsson, der eine energische Erfindernatur war, hatte in den siebziger Jahren große Pläne mit seiner Heißluftmaschine. Die Maschine sollte mit Hilfe von Hohlspiegeln direkt durch die Sonnenwärme getrieben werden und vorzugsweise in tropischen Ländern benutzt werden. Allein diese Sonnenmaschine hat bis jetzt keine nennenswerte Verwendung gefunden.

Fig. 103.



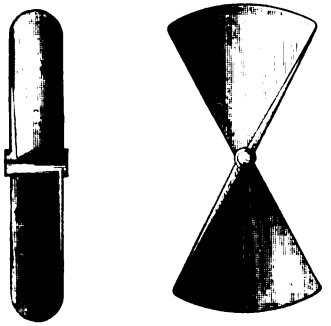
John Ericsson.

Ericsson hat den größten Teil seines Lebens in Amerika zugebracht. Er unterlag 1829 in der Konkurrenz um den Dampfwagen (§ 117) gegen Stephenson, und englische Autoritäten auf dem Gebiete der Mechanik gaben über seine Schiffsschraube ein abfälliges Urteil ab. Ja einige derselben suchten der Erfindung zu schaden, indem sie erklärten, der erste von ihm erbaute Schraubendampfer, der sich als ein vortreffliches Schiff erwiesen hatte, sei „im Prinzip falsch, fehlerhaft ausgeführt und augenscheinlich ohne irgend welchen Wert, so daß kein vernünftiger Mensch sich darauf einlassen könne, Fahrzeuge zu bauen, die dazu bestimmt seien, in dieser Weise fortbewegt zu werden". Ericsson entschloß sich daher (1839) auf den Rat eines Freundes, nach Amerika überzusiedeln, wo er mehr Empfänglichkeit für seine Ideen zu finden hoffte. Sein Propeller fand auch alsbald Anerkennung, und als die erste Schraubenfregatte „Princeton" im Jahre 1843 in einer Wettfahrt mit dem vorzüglichen Raddampfer „Great Western" diesen mit Glanz schlug, war der Sieg der Schraube über das Schaufelrad entschieden. Selbst in einigen europäischen Kriegsflotten wurde im Laufe weniger Jahre die Schraube eingeführt.

Digitized by Google

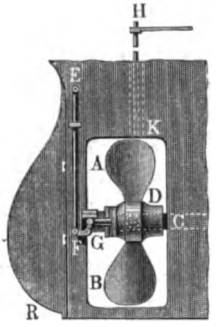
§ 111. Die Schiffsschraube besteht nicht aus einer vollen Windung einer Schraubenfläche, sondern aus zwei bis vier einzelnen „Flügeln". Die Form der Schraube, und zwar einer dreiflügeligen, sowie die Art und Weise, wie sie am Schiff angebracht wird, ist aus Fig. 104 und 105 ersichtlich. Die Schraube hat bedeutende Vorzüge vor dem Schaufelrade. Sie nimmt viel weniger Platz ein als dieses und sie befindet sich stets unter dem Wasser, selbst wenn das Schiff vom Winde auf die Seite gelegt wird. Bei einem

Fig. 104.



Schiffsschraube.

Fig. 105.



Schraube am Hintersteven des Schiffes.

Raddampfer erhebt sich unter solchen Umständen das eine Rad über das Wasser, während das andere um so mehr in dasselbe eindringt. Bei Kriegsschiffen spielt die Schraube eine sehr wichtige Rolle, da sie nicht leicht durch die feindlichen Geschosse getroffen werden kann. Auch für Handelsdampfer und Personendampfer hat die Schraube den Vorzug, daß sie nicht, wie die Radkasten, beim Anlegen hinderlich ist. Wegen des Fortfallens der Radkasten setzt ein Schraubendampfer dem Wasser einen viel geringeren Widerstand entgegen als ein Raddampfer, und endlich ist die Form des Schraubendampfers der Anwendung von Segeln nicht hinderlich, wie es beim Raddampfer der Fall ist.

Anderseits haben die Schaufelräder vor der Schraube den Vorzug, daß sie in ruhigem Wasser die Triebkraft besser ausnutzen als die Schraube. Daher werden auf Binnenseen und auf Flüssen noch vielfach Raddampfer benutzt.

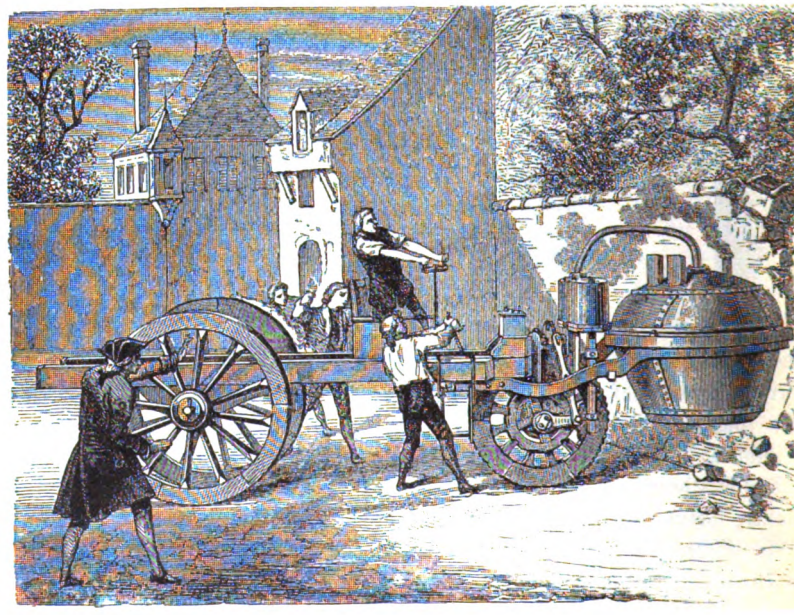
Ericsson hat, abgesehen von den genannten Entdeckungen, seinen Namen auch durch eine eigentümliche von ihm konstruierte Art von Panzerschiffen bekannt gemacht. Es sind dies die sogenannten Monitoren, Fahrzeuge von geringem Tiefgang, die mit einem oder mit zwei schweren Geschützen armiert sind. Ericssons erster Monitor wurde dadurch berühmt, daß er im amerikanischen Bürgerkriege den Nordstaaten in der Schlacht bei Hampton Red den Sieg verschaffte. Bei dieser Gelegenheit waren die Panzerschiffe zum ersten Male im Kampf, und es zeigte sich, daß der Monitor dem Panzerschiff der Südstaaten, Merrimac, bedeutend überlegen war.

Digitized by Google

Ericsson starb 1889 in Newyork. Seine Leiche wurde nach Schweden übergeführt, welches ihn mit wissenschaftlichen Auszeichnungen geehrt hatte und ihm 1899 in Göteborg ein Denkmal gesetzt hat.

§ 112. Brauchbare Dampfwagen kamen erst etwa 20 Jahre später in Gebrauch als Dampfschiffe. Es fehlte zwar nicht an Projekten, aber sie scheiterten an dem Umstande, daß die Wattsche Maschine mit dem Kondensator und dem zum Betriebe erforderlichen großen Wasservorrat für einen Wagen zu schwer war. Zur Bewegung eines Dampfwagens konnte nur die

Fig. 106.



Cugnots Dampfwagen.

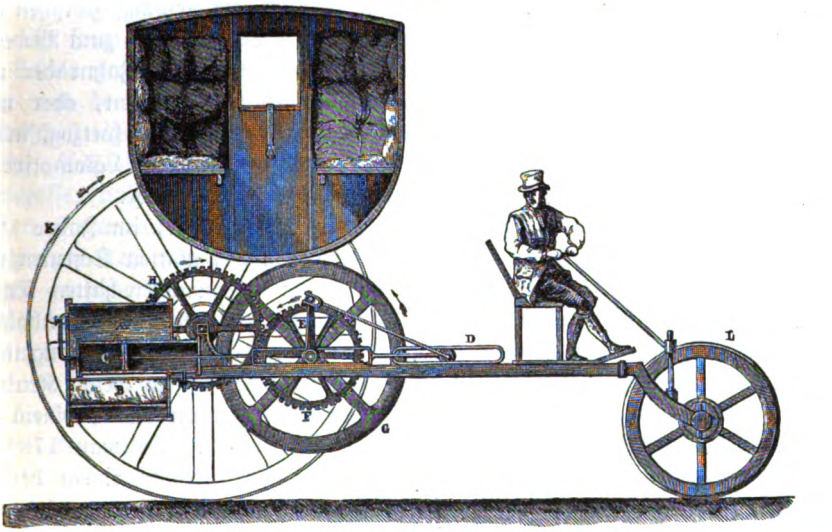
Hochdruckmaschine in Frage kommen. Der erste Versuch mit einer solchen Maschine wurde von Cugnot (1725 bis 1804) ausgeführt, der sich die Aufgabe gestellt hatte, die Dampfkraft zur Fortbewegung der Kanonen zu benutzen. Es gelang ihm, den französischen Kriegsminister für die Sache zu interessieren. Der erste Wagen (Fig. 106) war im Jahre 1770 fertig und machte seine erste Probefahrt im Hofe des Arsenals. Er wird noch heute in Paris aufbewahrt. Die Maschine war eine einfachwirkende und hatte zwei Zylinder. Der Kessel hatte innere Feuerung. Wie der Kessel mit der Maschine und diese mit den Vorderrädern des Wagens verbunden war, ist aus der Abbildung ersichtlich. Es zeigte sich, daß die Maschine vortrefflich geeignet war, den Wagen zu ziehen. Ja sie war so gut geheizt, daß der Wagen durchging und gegen die Umfassungsmauer des Hofes rannte. Cugnot

Digitized by Google

hatte kein Mittel, die Maschine und den Wagen zu steuern, und dies ist wahrscheinlich der Grund gewesen, daß keine weiteren Versuche mit dem Dampfwagen gemacht wurden.

§ 113. Die Hochdruckmaschine kam am frühesten in Nordamerika in Gebrauch, wo sie von Oliver Evans (1755 bis 1819) erfunden wurde. Dieser war ein mechanisches Genie, an dessen Namen sich noch verschiedene andere Erfindungen knüpfen. Seine Hochdruckmaschine hat sich gut bewährt, und sein Dampfwagen war so leicht zu lenken, daß er es wagen konnte, mit demselben die Straßen von Philadelphia zu befahren. Trotzdem kam er mit diesem Wagen nicht über das Versuchsstadium hinaus. Aber indirekt sind

Fig. 107.



Straßendampfwagen von Trevithick und Vivian.

seine Arbeiten doch für die Entwickelung des Dampfwagens von Nutzen gewesen. Seine Pläne wurden von zwei englischen Mechanikern Trevithick und Vivian aufgenommen, die auch die Hochdruckmaschine in England einführten. Sie erhielten 1801 ein Patent auf einen Dampfwagen, der in Fig. 107 abgebildet ist und der dazu bestimmt war, auf den gewöhnlichen Landstraßen benutzt zu werden. *A* ist der Dampfkessel, *B* die Feuerung und *C* der Zylinder. Die lange Kolbenstange wird durch die Kulisse *D* geführt. Durch die Treibstange wird die Kurbel *K* und durch diese das Zahnrad *F* gedreht. Von diesem wird die Bewegung auf das Zahnrad *H* übertragen, welches auf der Wagenachse sitzt. Das Schwungrad *F* dient zur Überwindung der toten Punkte. Durch das Steuerrad *L* wird die Richtung bestimmt, in der sich der Wagen bewegen soll.

Es zeigte sich jedoch, daß der Wagen auf der Landstraße nicht zu brauchen war. Die Bewegung desselben erforderte wegen der starken Reibung eine zu

Digitized by Google

große Kraft, und die Maschine kam infolge der fortwährenden Erschütterungen sehr bald in Unordnung.

Trevithick und Vivian beschlossen daher, einen Wagen zu konstruieren, der auf Schienen laufen sollte. — In Bergwerken hatte man schon lange Schienen benutzt, um schwer beladene Wagen leichter fortbewegen zu können. In Deutschland gab es bereits im 16. Jahrhundert Holzschienenwege. Als in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts das Eisen bedeutend billiger geworden war, wurden die hölzernen Schienen durch eiserne ersetzt.

Im Jahre 1804 fing man an, die Dampfwagen auf Schienen laufen zu lassen, und zwar mit gutem Erfolge. Die weitere Entwickelung der Eisenbahnen wurde jedoch in hohem Grade durch eine irrtümliche Ansicht über die Reibung zurückgehalten. Man glaubte nämlich, die Reibung zwischen den Schienen und den Rädern sei zu gering, um den Dampfwagen zum Bewegen schwerer Lasten benutzen zu können. Man benutzte daher Zahnräder und Zahnschienen, wie sie heute bei Bergbahnen gebraucht werden, oder man legte zwischen die Schienen ein Tau, an dem sich die Maschine fortzog, indem sie es auf eine Walze aufwickelte, ja man ging so weit, eine Lokomotive zu konstruieren, die durch eine Art Hinterbein fortgeschoben wurde.

Schließlich führte Blackett, ein englischer Ingenieur, im Jahre 1813 durch Versuche den Beweis, daß die Reibung zwischen glatten Schienen und den Rädern viel größer ist, als man bis dahin angenommen hatte. Damit war ein wesentliches Hindernis für die Vervollkommnung der Eisenbahnen aus dem Wege geschafft. Aber die Lokomotiven waren noch sehr mangelhaft, namentlich entwickelten sie im Vergleich zu ihrem Gewicht zu wenig Kraft.

§ 114. Um diese Zeit nahm George Stephenson das Problem der Konstruktion einer brauchbaren Lokomotive in Angriff. Er war 1781 in Wylam bei Newcastle geboren. Sein Vater war Arbeiter in einem benachbarten Kohlenbergwerke, wo er eine Newcomensche Maschine zu bedienen hatte. Der junge Stephenson wuchs in dürftigen, aber glücklichen Verhältnissen auf, denn er hatte gute Eltern. Schon als Knabe mußte er diesen behilflich sein, den Unterhalt zu erwerben und er erhielt daher keinen Schulunterricht. Im Alter von 17 Jahren erhielt er eine Stellung als Maschinist, die ihm wöchentlich 10 Shilling einbrachte. Jetzt war er in der Lage, in einer Abendschule Lesen und Schreiben zu lernen. Einige Jahre später wurde er Bremser. Als solcher hatte er den Gang der Maschine beim Herablassen und Heraufziehen der Förderkörbe zu regulieren.

Im 21. Lebensjahre verheiratete er sich, verlor aber seine Frau bereits nach vier Jahren, im Jahre 1806. Nach dem Tode seiner Frau übergab er seinen dreijährigen Sohn einer befreundeten Familie und siedelte nach Schottland über, um hier die Bedienung einer Wattschen Maschine zu übernehmen. In dieser Stellung hatte er gute Gelegenheit, die neue Maschine genau kennen zu lernen. Bereits nach einem Jahre kehrte er in die Heimat zurück. Er trat zunächst wieder in seine frühere Stellung ein, wurde aber alsbald zum Maschinenmeister befördert. Es sollte nämlich eine Newcomensche Maschine

Digitized by Google

aufgestellt werden, um eine neue Kohlengrube zu entwässern, was jedoch nicht gelingen wollte. Stephenson erbot sich, das Wasser im Laufe einer Woche wegzuschaffen, und obwohl der Ingenieur des Bergwerkes bezweifelte, daß es gelingen würde, ging er doch auf das Anerbieten Stephensons ein. Dieser verstärkte den Kessel, so daß er einen größeren Dampfdruck ertragen konnte, und sorgte dafür, daß die Verdichtung des Dampfes schnell erfolgte. Nach sechs Tagen war die Grube ausgepumpt, und Stephenson wurde von der Gesellschaft, der das Bergwerk gehörte, mit einem Gehalt von 1800 Shilling als Maschinenmeister angestellt.

Stephenson suchte jetzt eifriger als je sich Kenntnisse zu erwerben. Zuerst erhielt er Unterricht von dem Sohne eines Pächters aus der dortigen Gegend, und später wurde sein Sohn Robert sein Lehrer. Dieser erhielt eine sehr sorgfältige Erziehung und ritt jeden Tag nach Newcastle, um hier die Schule zu besuchen. Vater und Sohn wiederholten abends zusammen das, was der letztere in der Schule gelernt hatte, und lasen technische und wissenschaftliche Schriften, die der Sohn aus der Bibliothek in Newcastle entlehnte. Auf diese etwas ungewöhnliche Weise erwarb sich der Vater tüchtige Kenntnisse, und auch der Sohn zog aus der gemeinsamen Tätigkeit Vorteil. Er lernte namentlich von seinem Vater, Zeichnungen zu verstehen, ohne den zugehörigen Text nachlesen zu müssen, was ihm später jedenfalls von großem Nutzen gewesen ist.

§ 115. Die Versuche Blacketts über die Reibung (§ 113) wurden in George Stephensons Geburtsorte ausgeführt, wo auch fortwährend Versuche mit der Lokomotive gemacht wurden. Stephenson interessierte sich sehr für die neue „Fahrmaschine", verfolgte die Versuche mit der größten Aufmerksamkeit und glaubte die wesentlichsten Mängel in dem Bau der Maschine zu erkennen. Er erklärte sich bereit, eine praktische Fahrmaschine zu bauen, und die Besitzer des Bergwerks bei Killingworth, bei denen er als Maschinenmeister angestellt war, stellten ihm die erforderlichen Mittel zur Verfügung. Die wichtigsten Verbesserungen, welche er an der Maschine anbrachte, waren die folgenden:

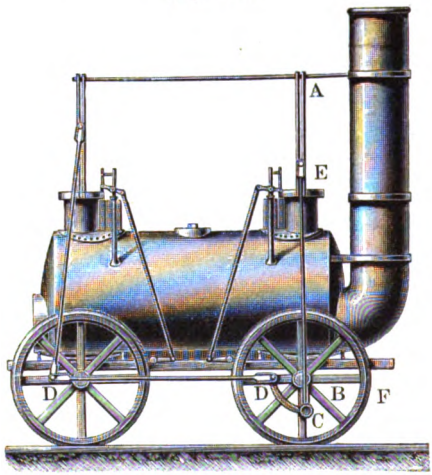
Vor allen Dingen sorgte er dafür, daß der Kessel mehr Dampf entwickelte, wodurch die Maschine kräftiger wurde. Um dies zu erreichen, vergrößerte er die Verdampfungsfläche und ließ den verbrauchten Dampf durch den Schornstein entweichen, wodurch der Luftzug in der Feuerung bedeutend verstärkt wurde. Sodann suchte er Erschütterungen und Stöße dadurch zu beseitigen, daß er den Kessel und die Maschine auf Federn ruhen ließ. Endlich verband (kuppelte) er das Vorderrad der Lokomotive durch die Stange *DD* (Fig. 108 a. f. S.) mit dem Hinterrad, so daß jedes der beiden Räder gezwungen war, die Bewegung des anderen mitzumachen und infolgedessen nicht so leicht auf den Schienen gleiten konnte. Die Maschine hatte zwei Zylinder, und die Kolben befanden sich in einer solchen Stellung, daß jeder von ihnen den anderen in der Überwindung der toten Punkte unterstützte.

Die in Fig. 108 abgebildete erste Maschine Stephensons ist das Vor-

Digitized by Google

bild für alle späteren Lokomotiven geworden. In der nächsten Zeit wurden verschiedene Maschinen dieser Art teils für die Bergwerke in Killingworth, teils für andere Schienenwege gebaut. Im Jahre 1825 wurde eine Bahn zwischen Stockton und Darlington eröffnet. Hier wurde die Lokomotive zum ersten Mal auf einer längeren Strecke und (seit 1828) zu einem regelmäßigen Betriebe mit Personenbeförderung benutzt.

Fig. 108.



Stephensons erste Lokomotive.

§ 116. Eine von Stephensons Lokomotiven kam 1828 nach Frankreich, wo ihr Arbeitsvermögen und ihre Geschwindigkeit von dem später so berühmt gewordenen Eisenbahningenieur Marc Séguin (1786 bis 1875) geprüft werden sollte. Es zeigte sich, daß die Lokomotive nur dreiviertel Meilen in der Stunde zurücklegte, und Séguin erkannte, daß der Kessel bedeutend mehr Dampf entwickeln, daß also die Verdampfungsfläche bedeutend vergrößert werden mußte. Er brachte daher im Kessel eine größere Anzahl enger Röhren an, die die Verbrennungsgase auf ihrem Wege nach dem Schornstein passieren mußten, so daß sie an das Wasser im Kessel eine viel größere Wärmemenge abgeben konnten. Séguin machte seine Versuche mit dem Kessel in einem Dampfboot. Stephenson griff die Idee sofort auf und legte einen Röhrenkessel in die Lokomotive, mit der er sich 1829 an dem berühmten Lokomotivwettfahren auf der Bahn von Liverpool nach Manchester beteiligte.

Fig. 109.

Pompejanischer Röhrenkessel.

Die Anwendung von Röhren in Wasserkesseln zur besseren Ausnutzung der Wärme war übrigens schon im Altertum bekannt. In Fig. 109 ist ein in Pompeji ausgegrabener Kessel abgebildet, der Ähnlichkeit mit einem russischen Samovar (Teekessel) hat. Der untere bauchige Teil des Kessels enthält einen Feuerkanal, der mit glühenden Kohlen gefüllt

Digitized by Google

wird. Durch den am Boden des Kessels befindlichen Rost fällt die Asche ab und tritt Luft ein. Der Rost der antiken Kessel hat vor dem Kessel eines Samovars den Vorzug, daß der Rost nicht aus massiven Stäben, sondern aus Röhren besteht und infolgedessen viel haltbarer ist, weil die Röhren mit Wasser gefüllt sind. Dies hat zugleich eine Ersparnis von Brennmaterial zur Folge, indem die an den Rost abgegebene Wärme in das Wasser übergeht.

Ein anderer pompejanischer Röhrenkessel, in dem das Röhrensystem deutlicher sichtbar ist, ist in Fig. 110 abgebildet. Bei diesem ist der Feuerraum kuppelförmig und bietet, zusammen mit dem Rost, dem Wasser eine große Erwärmungsfläche dar. Durch *E* tritt frische Luft ein und durch *e* entweichen die Verbrennungsgase in den Schornstein.

Fig. 110.

Pompejanischer Röhrenkessel.

§ 117. Stephenson hatte die Herstellung des Schienenweges zwischen den beiden genannten Städten selbst geleitet, allein die Eigentümer der Bahn waren keineswegs darüber einig, ob die Lokomotive als Zugkraft benutzt werden sollte. Erst als die Bahn so gut wie fertig war, erhielt Stephenson die Erlaubnis, die Arbeitswagen versuchsweise durch eine Lokomotive ziehen zu lassen, und da sich dies als außerordentlich vorteilhaft erwies, ließ sich die Bahnverwaltung überreden, eine Prämie von 500 Pfund Sterling für die beste Lokomotive auszusetzen, die gewisse Bedingungen erfüllte. Die Konkurrenz wurde auf den 6. Oktober 1829 festgesetzt, und außer Stephensons Lokomotive „The Rockett“ (Die Rakete) waren mehrere andere angemeldet, unter diesen John Ericssons „Novelty“ (Neuheit).

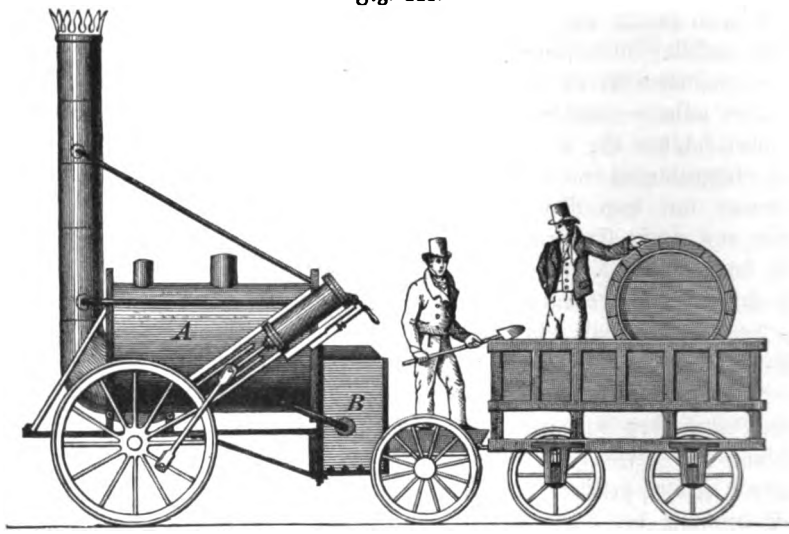
Der Kessel der „Rockett“ zerfiel in den eigentlichen Kessel *A* (Fig. 111 a. f. S.) und den doppelwandigen eisernen Kasten *B*, in welchem sich die Feuerung befand. Der Zwischenraum zwischen den beiden Wänden stand durch ein Rohr mit dem Kessel *A* in Verbindung, so daß das Wasser aus diesem in den Feuerkasten überlief und hier das Feuer von allen Seiten umgab. Die Feuergase entwichen durch 25 Röhren, die im Hauptkessel lagen (Fig. 112), in den Schornstein, in dem durch den verbrauchten Dampf ein starker Zug hervorgebracht wurde.

Die Maschine hatte zwei Zylinder, einen auf jeder Seite des Kessels. Die Kolbenstangen und die Treibstangen wirkten an zwei Kurbeln, die einen

Digitized by Google

rechten Winkel miteinander bildeten. Mit der Lokomotive war ein Wagen, der Tender, verbunden, auf dem Waſſer und Kohlen mitgeführt wurden.

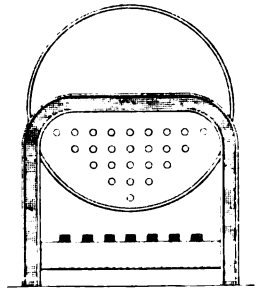
Fig. 111.



Stephenſons Lokomotive „Rocket“.

Das Waſſer wurde dem Keſſel kontinuierlich durch eine Druckpumpe zugeführt; die Feuerung wurde von einem Manne beſorgt.

Fig. 112.



Der Keſſel in der „Rocket“.

Die „Rocket“ wog 8500 Pfund und hatte ein etwas plumpes Ausſehen, aber ſie war in allen Einzelheiten ſehr ſorgfältig gearbeitet.

Ericſſons Maſchine „Novelty“ (Fig. 113) war bedeutend eleganter gebaut, wog nur halb ſo viel wie die „Rocket“ und hatte keinen Tender. Auch bei dieſer Maſchine wurde der Zug im Schornſtein künſtlich erzeugt, aber nicht durch den verbrauchten Dampf, ſondern durch Blaſebälge, die von der Maſchine bewegt wurden.

Bei der erſten Probefahrt erreichte die „Rocket“ eine Geſchwindigkeit von drei Meilen in der Stunde, während die „Novelty“ die doppelte Geſchwindigkeit erzielte, ſo daß es den Anſchein hatte, als ob ſie über die „Rocket“ den Sieg davontragen würde. Allein am folgenden Tage konnte Ericſſons Maſchine nicht an den weiteren Probefahrten teilnehmen, weil die Blaſebälge in Unordnung gekommen waren und der Keſſel an mehreren Stellen ſchadhaft geworden war. Die „Rocket“ dagegen befand ſich in tadelloſem Zuſtande und erreichte bei den weiteren Probefahrten eine Geſchwindigkeit von 7,5 Meilen in der Stunde.

Digitized by Google

Von den anderen Maſchinen konnte ſich keine auch nur annähernd mit der „Rocket“ meſſen, und der Preis wurde Stephenſon zuerkannt. Die

Fig. 113.

Ericſſons Lokomotive „Novelty“.

Maſchine Ericſſons fand wegen ihres eleganten Baues Anerkennung, aber ſie war zu kompliziert und nicht hinreichend ſolid ausgeführt.

§ 118. Mit dem Siege Stephenſons war die Annahme der Dampfkraft für den Betrieb der Eiſenbahnen entſchieden. Die Lokomotive wurde zuerſt auf der Bahn von Liverpool nach Mancheſter eingeführt, und alsbald wurden umfangreiche Eiſenbahnbauten ſowohl in England als auf dem Kontinent in Angriff genommen. Die Bahn von Liverpool nach Mancheſter wurde 1830 dem Betriebe übergeben. Die älteſte Bahn in Deutſchland (eröffnet 1835) iſt die 6 km lange Strecke von Nürnberg nach Fürth.

Da wo das Terrain der Anlage von Eiſenbahnen Hinderniſſe entgegenſtellte, hatten die Ingenieure zahlreiche ſchwierige Aufgaben zu löſen. Auch auf dieſem Gebiete wirkte Stephenſon bahnbrechend. Er bohrte Tunnels, führte den Schienenweg über Sümpfe und baute Brücken. Bei dieſen Arbeiten war übrigens Robert Stephenſon die leitende Kraft. Er hatte eine gute Ausbildung erhalten, indem er die Univerſität in Edinburg beſucht hatte und drei Jahre in Südamerika als Ingenieur tätig geweſen war. Seit 1827 arbeitete er mit ſeinem Vater zuſammen und war daher auch an dem Bau der Bahn von Liverpool nach Mancheſter beteiligt. Robert Stephenſon hat ſich namentlich als Brückenbauer einen Namen gemacht. Die bekannteſten von ihm erbauten Brücken ſind die Eiſenbahnbrücke über den Tyne bei Newcaſtle, die Britanniabrücke, durch welche die Inſel Angleſea mit der engli-

Digitized by Google

ſchen Küſte verbunden iſt, und die faſt eine halbe Meile lange Viktoriabrücke, die in einer Höhe von 20 m über den Sankt Lorenzſtrom führt.

Fig. 114.

George Stephenſon.

George Stephenſon wurde in faſt allen europäiſchen Staaten bei der Anlage der erſten Eiſenbahnen zu Rate gezogen. Seinen zuverläſſigen Anweiſungen iſt es zu verdanken, daß die Eiſenbahnen ſolid gebaut wurden und infolgedeſſen ſchnell Eingang fanden.

Er wurde ſelbſtverſtändlich ein reicher Mann. Im Jahre 1831 kaufte er das Gut Snibſton, wo er ein Kohlenbergwerk betrieb. Hier war er beſtrebt, die Lebensverhältniſſe ſeiner Arbeiter nach Möglichkeit günſtig und angenehm zu geſtalten. Er ſorgte dafür, daß ſie gute und behagliche Wohnungen bekamen, und erbaute Kirchen und Schulen, damit die Kinder der Arbeiter den Unterricht erhalten konnten, den er ſelbſt als Kind entbehrt hatte. Er ſtarb 1848.

Digitized by Google

Die Natur der Wärme.

§ 119. Was ist Wärme? Dies war unter den Philosophen und Naturforschern seit den ältesten Zeiten eine offene Frage gewesen. Über das Wesen der Wärme gab es im wesentlichen zwei verschiedene Auffassungen. Nach der einen ist sie ein Stoff, der von einem Körper zum anderen übergeht, nach der anderen dagegen eine Art Bewegung.

Es ist nicht schwer, für jede dieser beiden Auffassungen aus den Erfahrungen des täglichen Lebens Stützpunkte zu finden. Die Vorstellung, daß die Wärme etwas Materielles ist, paßt vortrefflich zu den Vorstellungen, die man allgemein mit den Begriffen der Erwärmung und der Abkühlung verbindet.

Nach der ersteren Auffassung wird ein Körper dadurch warm oder kalt, daß er Wärmestoff aufnimmt oder abgibt. Da man nun nicht selten darauf hinweisen kann, daß die Erwärmung eines Körpers die Abkühlung eines anderen zur Folge hat, so liegt es nahe, sich die Wärme als etwas Materielles vorzustellen, welches von dem einen Körper zum anderen übergeht.

Anderseits ist es aber eine seit den ältesten Zeiten bekannte Beobachtung (§ 1), daß zwei Körper warm werden, wenn sie aneinander gerieben werden. Hier kann von einem Übergang von Wärme von dem einen zum anderen Körper nicht die Rede sein, denn die Körper werden infolge der Reibung warm, auch wenn sie beide vor dem Reiben kalt waren. Der einfachste Schluß aus dieser Reibungserscheinung ist offenbar der, daß ein Zusammenhang zwischen der Bewegung (die die Reibung bewirkt) und der Wärme (die durch die Reibung erzeugt wird) existieren muß. Die alten griechischen Philosophen haben auch tatsächlich diesen Schluß gezogen. Trotzdem hat die Theorie des Wärmestoffes bis in das 19. Jahrhundert hinein ihre Anhänger gehabt.

Heron (vergl. I., § 209) erklärte den Vorgang der Erwärmung durch die Annahme, daß materielle Teilchen in den Körper eindringen. Später erweiterte man diese Anschauung in der Weise, daß man sich auch die Kälte als einen selbständigen Stoff vorstellte. Gassendi (1508 bis 1588) erblickte einen Beweis für die Richtigkeit dieser Annahme in der Tatsache, daß Wasser und Salpeter Kälte erzeugen, wenn sie gemischt werden, ähnlich wie andere Stoffe (z. B. Schwefelsäure und Wasser) beim Vermischen Wärme erzeugen. Solange die aristotelische Naturanschauung die herrschende war, war es natürlich, daß man die Wärme als einen Stoff betrachtete, da die vier aristotelischen Elemente, Feuer, Erde, Wasser und Luft, sämtlich als Stoffe angesehen wurden.

Digitized by Google

Als sich aber im 16. und 17. Jahrhundert die freie Forschung zu regen anfing, erhoben sich auch Stimmen gegen die Annahme, daß die Wärme ein Stoff sei. So sagt Francis Bacon (I., § 167), bei der Erwärmung könne keine Mitteilung eines Stoffes stattfinden, weil der erwärmende Körper an seinem Gewicht nichts verliere, und da alle Körper durch Reibung warm werden, sei die Möglichkeit eines selbständigen Wärmestoffes ausgeschlossen. Nach seiner Ansicht ist die Wärme eine „ausdehnende Bewegung, die von den kleinsten Teilchen des Körpers ausgeführt wird".

§ 120. Nach Bacons Zeit haben viele Physiker durch Wägung zu entscheiden versucht, ob die Wärme ein Stoff im gewöhnlichen Sinne des Wortes ist. Namentlich gegen Ende des 18. Jahrhunderts, als die Chemie durch den Gebrauch der Wage in neue Bahnen gelenkt wurde, versuchte man auch diese Frage mit Hilfe der Wage zu entscheiden. Diese Versuche führten jedoch zu keinem bestimmten Resultate. Einige Beobachter fanden sogar, daß ein Körper im warmen Zustande leichter ist als im kalten, was übrigens leicht zu erklären ist. Wenn nämlich ein warmer Körper auf die Wagschale gelegt wird, so erwärmt er die Luft, welche ihn umgibt, und es entsteht infolgedessen ein aufsteigender Luftstrom über der Wagschale. Zugleich verdrängt der Körper im warmen Zustande eine größere Raummenge Luft und wiegt daher (in der Luft) wirklich etwas weniger als im kalten Zustande.

Ein sehr genauer Wägungsversuch wurde 1799 vom Grafen Rumford ausgeführt. Er füllte gleiche Gewichtsmengen Wasser, Spiritus und Quecksilber in drei Flaschen von gleicher Größe. Durch Umwickeln der Flaschenhälse mit Silberdraht stellte er vollkommene Gleichheit des Gewichtes her. Dann stellte er die Flaschen in ein eiskaltes Zimmer und wog sie von neuem, nachdem sie die Temperatur des Zimmers angenommen hatten. Es ergab sich, daß die Flaschen nebst Inhalt genau dasselbe Gewicht wie vorher hatten, trotzdem das Wasser zu Eis erstarrt war und also seine Schmelzwärme abgegeben hatte. Graf Rumford zog aus diesem Versuche den Schluß, daß die Existenz eines Wärmestoffes durch Wägung nicht nachzuweisen ist. Durch diesen Versuch war auch die höchst merkwürdige Theorie, daß der Wärmestoff ein negatives Gewicht habe, widerlegt. Das „negative" Gewicht stellte man sich so vor, daß der Wärmestoff von der Erde abgestoßen wird und also unter der Einwirkung einer vertikal nach oben gerichteten Kraft steht. Dies sollte zur Folge haben, daß ein Körper im warmen Zustande weniger wiegt als im kalten.

§ 121. Graf Rumford hatte sich bereits früher mit der Frage nach der Natur der Wärme beschäftigt und hatte seine Beobachtungen nicht mit der Vorstellung von der Existenz eines Wärmestoffes in Einklang bringen können. Seine erste Beobachtung fällt in das Jahr 1778, aber seinen entscheidenden Versuch führte er erst 1798, also 20 Jahre später aus.

Graf Rumford hieß ursprünglich Benjamin Thompson. Er war 1753 zu Woburn in Massachusetts geboren. Von einem Geistlichen, der sich seiner annahm — sein Vater war früh gestorben und seine Mutter hatte sich

Digitized by Google

wieder verheiratet — erhielt er als Knabe guten Unterricht, namentlich auch in Mathematik. Als er kaum erwachsen war, wurde er Lehrer an einer Dorfschule, und mit 19 Jahren verheiratete er sich mit der Tochter eines Geistlichen in Rumford. Beim Ausbruch des amerikanischen Freiheitskrieges schloß er sich der königlichen Partei an und trat in die Armee ein. Im Jahre 1774 mußte er nach Boston flüchten, welches von den englischen Truppen besetzt war. Zwei Jahre später wurden diese vertrieben und B. Thompson wurde in einer wichtigen Angelegenheit nach England geschickt. Während seines Aufenthaltes in London begann er seine physikalischen Untersuchungen

Fig. 115.

Graf Rumford.

und wurde 1778 Mitglied der Royal Society. Nachdem er nochmals am amerikanischen Kriege teilgenommen hatte, kehrte er 1783 nach dem Friedensschluß nach London zurück und wurde im Kriegsministerium angestellt. In dieser Stellung übte er auf verschiedene militärische Verhältnisse einen bedeutenden Einfluß aus. Im Jahre 1784 verließ er England, um in die Dienste des Kurfürsten von Bayern zu treten. Hier entfaltete er eine außerordentlich vielseitige Tätigkeit. Er beschäftigte sich mit wissenschaftlichen Untersuchungen und wurde Mitglied verschiedener gelehrter Gesellschaften. Als Kriegsminister reformierte er das bayerische Heer, was ihm ebenfalls ver-

Digitized by Google

schiedene Auszeichnungen, namentlich 1790 die Ernennung zum Grafen von Rumford einbrachte. Endlich löste er verschiedene soziale Aufgaben. Er errichtete technische Schulen und organisierte Arbeitshäuser, wodurch er die Bettelei in München beseitigte. In verschiedener Weise suchte er den Armen zu Hilfe zu kommen. Er konstruierte sparsam brennende Öfen, führte die Dampfheizung ein, gab Anweisung zur Herstellung billiger und haltbarer Kleider, sowie billiger und kräftiger Nahrungsmittel (Rumfordsche Suppe). Auch dem Anbau der Kartoffel wendete er seine Aufmerksamkeit zu, und im Interesse der weniger Bemittelten legte er den englischen Garten in München an.

Seit 1799 lebte Rumford wieder in London. In diesem Jahre nahm er wesentlichen Anteil an der Errichtung der Royal Institution, die sich die Aufgabe stellte, „die Wissenschaft zu verbreiten und die Einführung nützlicher mechanischer Erfindungen und Verbesserungen zu erleichtern, sowie durch naturwissenschaftliche Vorträge und Experimente Anleitung zur Ausnutzung der Wissenschaft im täglichen Leben zu geben". Später haben einige der hervorragendsten Physiker, wie Humphrey Davy und Michael Faraday, an der Spitze der Royal Institution gestanden, und im Laboratorium des Instituts sind in neuerer Zeit mehrere der bedeutungsvollsten Untersuchungen ausgeführt worden. Ebenso hat das Institut in vorzüglicher Weise die Aufgabe gelöst, die Schätze der Naturwissenschaften den weiteren Kreisen der Gebildeten zugänglich zu machen. Die Royal Institution hat in dieser Richtung ähnlichen Anstalten in anderen Ländern als Vorbild gedient.

Seine letzten Jahre verlebte Rumford in Auteuil bei Paris. Er hatte die Witwe Lavoisiers geheiratet, doch wurde die Ehe nach kurzer Zeit wieder getrennt. Rumford starb 1814.

§ 122. Die physikalischen Arbeiten Rumfords betreffen vorzugsweise die Wärme. Wir besitzen von ihm einen ausführlichen Bericht darüber, wie er zu seinen Versuchen über die Natur der Wärme veranlaßt wurde. Er schreibt: „Als ich neulich im Zeughause in München dem Kanonenbohren zusah, erstaunte ich über die hohe Temperatur, die das Metall beim Bohren in kurzer Zeit annahm, sowie über die noch höhere Temperatur, welche die Metallspäne annahmen. Diese war höher als die Temperatur des siedenden Wassers.

Je mehr ich über die Erscheinung nachdachte, desto merkwürdiger und interessanter kam sie mir vor. Ja es ist zu hoffen, daß eine sorgfältige Untersuchung derselben eine tiefere Einsicht in die unbekannte Natur der Wärme geben und uns in den Stand setzen wird, die Frage der Existenz oder Nichtexistenz eines feuerartigen Fluidums zu entscheiden, eine Frage, über die die Ansichten der Gelehrten zu allen Zeiten sehr geteilt gewesen sind.

Woher kommt die Wärme, die bei dem genannten mechanischen Prozeß (dem Bohren) tatsächlich auftritt? Vielleicht von den Metallspänen, die der Bohrer von der zusammenhängenden Metallmasse abschneidet?

Wenn dies der Fall ist, so muß im Hinblick auf die neuere Lehre von

Digitized by Google

der gebundenen Wärme und der spezifischen Wärme derjenige Teil des Metalles, welcher zu Spänen geworden ist, nicht nur seine spezifische Wärme verändert haben, sondern die Veränderung muß auch groß genug sein, um die gesamte auftretende Wärmemenge zu erklären." Wenn nämlich die spezifische Wärme geringer wird, so müssen die Späne bei gleicher Wärmemenge eine höhere Temperatur annehmen.

Rumford bestimmte die spezifische Wärme der Metallspäne und fand dieselbe ebenso groß wie die des Metalls. Die Wärme rührte also nicht von einer Veränderung der spezifischen Wärme her. Rumford bewies dies außerdem noch dadurch, daß er den scharfen Bohrer durch einen stumpfen ersetzte, der mit einem Druck von ungefähr 10 000 Pfund gegen das Metall gedrückt wurde, so daß er dem Drehen denselben Widerstand entgegensetzte wie der scharfe Bohrer. Jetzt brachte der Bohrer nur eine verschwindende Menge von Metallpulver hervor, und doch erwärmte sich das Metall sehr stark.

Rumford wollte sich dann vergewissern, ob die Wärme vielleicht aus der Luft stammte. Er setzte daher den Metallzylinder, der ausgebohrt werden sollte, in einen mit Wasser gefüllten hölzernen Kasten, ließ den Bohrer arbeiten und fand, daß die Wärmeentwickelung im Wasser ebensogut stattfand wie in der Luft. Als der Bohrer $2^1/_2$ Stunden in Tätigkeit gewesen war, kam das Wasser (19 Pfund) ins Sieden. „Es ist schwer", sagt Rumford, „das Erstaunen und die Überraschung zu beschreiben, die sich auf den Gesichtern der Umstehenden zu erkennen gab, als sie sahen, wie eine so große Menge Wasser ohne Feuer zum Sieden gebracht wurde."

„Wenn man aus diesen Versuchen seine Schlüsse zieht, darf man nicht vergessen, daß die Quelle der durch Reibung erzeugten Wärme offenbar unerschöpflich ist. Es ist kaum nötig, hinzuzufügen, daß etwas, was aus einem isolierten Körper, d. h. einem Körper, der nicht mit anderen in Verbindung steht, in unbegrenzter Menge gewonnen werden kann, unmöglich eine materielle Substanz sein kann, und es ist schwierig, wenn nicht unmöglich, sich unter der Wärme etwas anderes vorzustellen als eine Art Bewegung. — Ich will keineswegs behaupten, daß ich es weiß, wie diese eigentümliche Art der Bewegung entsteht, sich erhält und fortpflanzt, und ich will keine Vermutungen vorbringen, die der Begründung entbehren, um so weniger, als es sich um eine Sache handelt, die die größten Gelehrten seit Jahrtausenden vergebens aufzuklären versucht haben. Aber selbst wenn die mechanische Erklärung der Wärme eines von den Naturgeheimnissen sein sollte, die außerhalb des Bereiches des menschlichen Verstandes liegen, so darf uns dies nicht entmutigen oder zurückhalten, die Gesetze der Wirkungen der Wärme zu erforschen. Wie weit können wir auf den Wegen, die uns die Wissenschaft geöffnet hat, vordringen, bevor wir uns von den dichten Nebeln umgeben finden, die nach allen Richtungen hin den Horizont des menschlichen Verstandes begrenzen? Aber wie reich und interessant ist dennoch das Gebiet, welches uns zugänglich ist!"

Rumford berechnete die Wärmemenge, die durch den Versuch erzeugt

Digitized by Google

wurde, und da er wußte, daß ein Pferd den Bohrer in Bewegung setzen konnte, war er in der Lage, die erzeugte Wärmemenge mit der Arbeitskraft eines Pferdes vergleichen zu können. Er kam zu dem Resultate, daß es kostspielige Wärme ist, die man auf diese Weise erzeugt, und daß man eine größere Wärmemenge erzeugt, wenn man das Futter des Pferdes verbrennt, daß es also nicht rentabel ist, Wärme durch Reibung zu erzeugen.

§ 123. Die Abhandlung Rumfords über diesen Gegenstand erschien in den Schriften der Royal Society im Jahre 1798. Ein Jahr später veröffentlichte ein junger Chemiker in Bristol einige höchst sinnreich erdachte Versuche über denselben Gegenstand. Dieser junge Mann hieß Humphrey Davy und war 1778 in Penzance in Cornwall als Sohn eines armen Holzschnitzers geboren. Ohne eine gute Schulbildung genossen zu haben, kam er zu einem Chirurgen in die Lehre. Hier hatte er Gelegenheit, wissenschaftliche Werke zu lesen, und es waren namentlich die Werke chemischen Inhaltes, die ihn besonders anzogen. Durch eifriges Studium erwarb er sich bedeutende Kenntnisse, und 1798 erhielt der zwanzigjährige junge Mann eine verhältnismäßig gute Stellung in einem chemischen Laboratorium in Bristol, wo er verschiedene neuentdeckte Luftarten darzustellen hatte, deren Bedeutung für die Heilkunde untersucht werden sollte. Im Jahre 1799 erschien seine erste Schrift „Über Wärme und Licht", in welcher Versuche über die Natur der Wärme beschrieben werden. Durch seine genialen chemischen Arbeiten hatte er sich bald einen bekannten Namen gemacht, und bereits 1801 wurde er als Professor an die Royal Institution (§ 121) berufen. Hier führte er eine Reihe von höchst bedeutungsvollen Experimentaluntersuchungen aus, die wir zum Teil im folgenden kennen lernen werden.

Fig. 116.

Humphrey Davy.

Davy wurde 1803 Mitglied und 1820 Präsident der Royal Society. Im Jahre 1812 heiratete er eine sehr reiche Dame, gab im folgenden Jahre seine Stellung bei der Royal Institution auf und unternahm eine längere Reise nach Frankreich und Italien. Auf dieser Reise begleitete ihn sein Assistent Michael Faraday, der sein berühmtester Nachfolger an der Royal Institution wurde.

Seine letzten Lebensjahre brachte Davy größtenteils auf Reisen zu, um seine angegriffene Gesundheit zu stärken. Auf einer dieser Reisen erkrankte er 1828 in Rom und starb auf der Heimreise anfangs 1829 in Genf.

§ 124. Einer von Davys Versuchen über die Wärme bestand darin, daß er zwei Eisstücke durch Reibung zum Schmelzen brachte. Dabei beob-

Digitized by Google

achtete er, daß das entstehende Wasser eine höhere Temperatur hatte als die umgebende Luft. Da nun die spezifische Wärme des Wassers ungefähr doppelt so groß ist als die des Eises (vergl. I., § 54), so bewies dieser Versuch, daß die erzeugte Wärme nicht von einer Veränderung der spezifischen Wärme herrührte.

Sodann zeigte Davy, daß die Reibungswärme nicht aus der Umgebung stammt. Er setzte unter die Glocke der Luftpumpe ein Uhrwerk, welches eine Scheibe, die eine Metallplatte berührte, in Drehung versetzte. Nachdem die Luft ausgepumpt war, wurde die Glocke mit eiskaltem Wasser umgeben. Die Scheibe und die Metallplatte wurden infolge der Reibung warm, so daß eine Wachsschicht, mit der die Platte überzogen war, schmolz. Hier war die Möglichkeit, daß die Wärme durch die eiskalte Glocke und den luftleeren Raum eingedrungen sein könnte, ausgeschlossen. Davy sah daher seine Versuche für einen unwiderleglichen Beweis dafür an, daß die Wärme nicht ein Stoff, sondern eine Art Bewegung ist.

Obwohl die Versuche Rumfords und Davys in weiteren Kreisen bekannt wurden, blieb die in mancher Hinsicht bequemere Ansicht, daß die Wärme etwas Stoffliches sei, noch längere Zeit die herrschende.

In der zunächst folgenden Zeit wurde eine Reihe von Untersuchungen ausgeführt, die den Übergang der Wärme von einem Körper zu einem anderen, sowie von den einen zu anderen Teilchen eines Körpers betreffen, und auch diese Untersuchungen führten auf anderem Wege zur Erörterung der Frage nach der Natur der Wärme.

Wärmestrahlen.

§ 125. Es bedarf keiner wissenschaftlichen Forschung, um zu erkennen, daß sich die Wärme in allen Körpern gleichmäßig zu verteilen sucht. Wenn warme und kalte Körper einander gegenübergestellt werden, so geben die ersteren Wärme ab und die letzteren nehmen Wärme auf, und unter gewissen Bedingungen pflanzt sich die Wärme mit außerordentlicher Geschwindigkeit durch den Raum fort. Wenn die von einer Wolke bedeckte Sonne hervortritt, so bemerkt man auf der Erde augenblicklich die Sonnenwärme, so hoch auch die Wolke über der Erde schwebt. Die Wärme schreitet mit derselben Geschwindigkeit wie das Licht fort, sie strahlt wie dieses durch den Raum und kann wie dieses durch Hohlspiegel (Brennspiegel) und Linsen (Brenngläser) gesammelt werden. Dies war schon im Altertume bekannt (vergl. I., § 89 und 94). Della Porta erwähnt dies in seinen Schriften und bemerkt zugleich, daß auch die „Kälte" von einem Spiegel zurückgeworfen wird.

Digitized by Google

Er geht jedoch nicht näher auf die Sache ein, dagegen machte die Accademia del Cimento einen interessanten Versuch über die „Kältestrahlung".

Die Akademiker stellten einen Eisblock von 500 Pfund in einem bedeutenden Abstande von einem Hohlspiegel auf, in dessen Brennpunkt sie eins von ihren Thermometern anbrachten. Dieses zeigte augenblicklich eine bedeutende Abkühlung an. Sie untersuchten sodann, ob das Fallen des Thermometers durch die direkte Einwirkung des Eisblockes verursacht werde, indem sie zwischen das Thermometer und den Spiegel einen Schirm stellten. Dies hatte aber zur Folge, daß das Thermometer sofort auf die Temperatur der umgebenden Luft stieg. Es war also nicht die direkte Wirkung des Eises, die sich geltend machte. Nur wenn der Hohlspiegel die vom Eis ausgehenden „Kältestrahlen" auf der Thermometerkugel vereinigte, wurde diese abgekühlt.

In ähnlicher Weise erkannten die Florentiner Akademiker auch das Ausstrahlen der Wärme von erhitzten Körpern.

§ 126. Die Bezeichnung „strahlende Wärme" ist nicht alt. Sie wurde von dem schwedischen Chemiker Karl Wilhelm Scheele eingeführt, der sie in seiner 1778 erschienenen Schrift „Über Licht und Feuer" gebrauchte. Scheele macht einen scharfen Unterschied zwischen der Wärme, die über dem Feuer mit der Luft nach oben geht, und der Wärme, die von dem Feuer nach allen Richtungen ausgestrahlt wird und die man bemerkt, wenn man dem Feuer das Gesicht zuwendet. Er beobachtete nämlich, daß die „strahlende Wärme" nicht von der Erwärmung der Luft herrührt, denn selbst wenn zwischen dem Feuer und dem Gesicht ein kalter Luftstrom war, machte sich in der Wirkung der Wärmestrahlen keine Verminderung bemerkbar.

Scheele untersuchte nun, ob die „strahlende Wärme" durch das von dem Feuer ausgehende Licht erzeugt wird. Er sammelte zuerst die „strahlende Wärme" vermittelst eines Hohlspiegels und setzte dann zwischen diesen und das Feuer eine klare Glasscheibe. Es zeigte sich, daß die vom Feuer ausgehenden Lichtstrahlen nach wie vor vom Hohlspiegel gesammelt wurden, aber im Vereinigungspunkt der Strahlen war jetzt von Wärme kaum etwas zu bemerken. Scheele schloß hieraus, daß das Glas die „strahlende Wärme" eingesogen, die Lichtstrahlen dagegen durchgelassen hatte, daß es also nicht die Lichtstrahlen waren, die die „strahlende Wärme" mit sich führen.

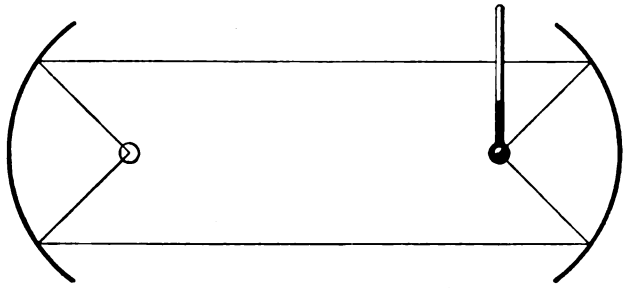
Ungefähr 100 Jahre früher (1682) hatte Mariotte (I, § 260) denselben Unterschied zwischen Lichtstrahlen und Wärmestrahlen oder vielmehr zwischen der Wärme der Sonnenstrahlen und der Wärme gemacht, die von einem gewöhnlichen Feuer ausgeht. Er fand, daß die Sonnenwärme so gut wie ungeschwächt durch ein Glas geht, so daß sie durch eine Linse gesammelt werden kann, während die Wärme von einem Kaminfeuer nicht durch eine dünne Glasplatte hindurchgehen kann.

§ 127. Im Jahre 1779, also ein Jahr später als Scheele seine Schrift „Über Licht und Feuer" veröffentlicht hatte, erschien ein von Johann Heinrich Lambert (geb. 1728 in Mülhausen im Elsaß, gest. 1777 in

Digitized by Google

Berlin) hinterlassenes Werk über Feuer und Wärme (Pyrometrie). Lambert hatte sich namentlich mit Lichtmessung beschäftigt und war zu dem Schluß gekommen, daß die Fortpflanzung und Spiegelung der „Feuerstrahlen" und der Lichtstrahlen genau dieselben Gesetze befolgen. Er macht ausdrücklich darauf aufmerksam, daß die „dunkle Wärme", die von einer mit heißem Wasser gefüllten eisernen Kugel ausgesandt wird, von einem Hohlspiegel nach

Fig. 117.



Lamberts Aufstellung zweier Hohlspiegel.

dem Spiegelungsgesetz zurückgeworfen wird. Zu seinen Versuchen benutzte er zwei Hohlspiegel (Metallspiegel), die so einander gegenübergestellt waren, daß ihre Achsen in dieselbe gerade Linie fielen (Fig. 117).

Dieselbe Aufstellung zweier Hohlspiegel (aus Zinn) benutzte M. A. Pictet (1752 bis 1825), Professor in Genf, bei seinen Versuchen über die Wärmestrahlung. Die Spiegel hatten einen Fuß Durchmesser und standen 12 Fuß voneinander entfernt. Wenn in den einen Brennpunkt eine erwärmte, aber nicht glühende Kugel gebracht wurde, so stieg ein Thermometer, dessen Kugel sich im Brennpunkt des anderen Spiegels befand, um 13° C, während ein anderes Thermometer in derselben Entfernung, aber außerhalb des Brennpunktes, keine Erwärmung anzeigte.

Wurde die warme Kugel mit einem kalten Körper, z. B. mit Schnee, oder mit einer Kältemischung vertauscht, so sank das Thermometer augenblicklich unter die Temperatur der Luft. Pictet war anfangs über diese Erscheinung sehr erstaunt, er fand jedoch bald die Erklärung derselben, indem er erkannte, daß bei diesem Versuch das Thermometer der warme Körper war, der die Wärme nach dem Schnee oder der Kältemischung im Brennpunkt des anderen Spiegels ausstrahlte. Hiermit fällt der Begriff „Kältestrahlen" fort. Der Versuch der Accademia del Cimento mit dem Eisblock (§ 125) läßt sich selbstverständlich in derselben Weise erklären.

§ 128. Eine Erklärung des Pictetschen Spiegelversuchs wurde von einem anderen Genfer Professor, Pierre Prevost (1751 bis 1839), zu geben versucht. Er veröffentlichte 1791 eine Abhandlung über „das Gleichgewicht der Wärme" und später (1809) eine ausführlichere Schrift über denselben Gegenstand.

Digitized by Google

Nach Prevoſts Anſicht beſteht die (ſtrahlende) Wärme aus äußerſt kleinen Teilchen, die ſich mit großer Geſchwindigkeit bewegen. Jeden Punkt der Oberfläche eines warmen Körpers betrachtet er als ein Zentrum, von welchem Wärmeteile nach allen Richtungen hin ausſtrahlen und nach welchem Wärmeteile von allen Seiten her hinſtrömen.

Durch jeden Punkt des Raumes gehen alſo Strahlen von Wärmeteilen nach allen Richtungen, und zwei Punkte ſind miteinander im Wärmegleichgewicht, wenn ſie ſich in derſelben Zeit einander gleich viel Wärmeteile zuſenden. Wenn die Temperatur eines Körpers unverändert bleibt, ſo hat dies ſeinen Grund darin, daß er ebenſoviel Wärmeteile von der Umgebung empfängt, als er an dieſe abgibt. „Der Körper verhält ſich wie ein See, in den es regnet, während gleichzeitig dieſelbe Menge Waſſer verdampft."

§ 129. Aus dieſer Betrachtung Prevoſts ergeben ſich verſchiedene Folgerungen. Für ihn iſt die Erſcheinung der Wärmeſtrahlung zwiſchen mehreren Körpern eine Wechſelwirkung. Nicht nur der warme Körper ſendet Strahlen nach dem kalten, ſondern jeder Körper ſtrahlt Wärme in die Umgebung aus, und die Größe der Ausſtrahlung wird durch die Temperatur des Körpers und die Beſchaffenheit der Umgebung beſtimmt. Wenn verſchiedene Körper dieſelbe Temperatur haben, ſo befinden ſie ſich gegeneinander im Strahlungsgleichgewicht, d. h. die Temperatur derſelben erhält ſich unverändert. Die Strahlung zwiſchen ihnen muß alſo jedem Körper ebenſoviel Wärmeteile zuführen, als ſie ihm entzieht.

Durch Ausſtrahlung gibt ein Körper Wärmeteile ab und durch Einſaugung (Abſorption) nimmt er Wärmeteile auf. Wenn alſo mehrere Körper im Strahlungsgleichgewicht ſind, ſo muß die Ausſtrahlung und die Einſaugung gleich groß ſein.

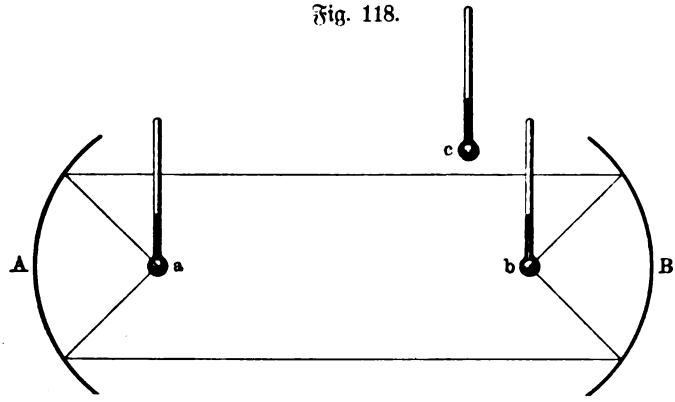
Bevor wir näher auf die Schlüſſe eingehen, die aus dem Strahlungsgleichgewicht gezogen werden können, müſſen wir uns mit den Unterſuchungen bekannt machen, die am Anfang des 19. Jahrhunderts über die Ausſtrahlung und Einſaugung der Wärmeſtrahlen gemacht wurden. Doch ſoll Pictets Spiegelverſuch (vgl. § 127) bereits hier mit Hilfe des Strahlungsgleichgewichtes erklärt werden. Wenn ſich in jedem der beiden Brennpunkte ein Körper befindet, der dieſelbe Temperatur hat wie der andere, ſo iſt ſelbſtverſtändlich Wärmegleichgewicht vorhanden, denn die beiden Körper ſenden ſich gegenſeitig gleiche Wärmemengen zu. Wenn dagegen der eine Körper wärmer als der andere iſt, ſo ſendet er mehr Wärme aus, während der andere nach wie vor dieſelbe Wärmemenge ausſtrahlt. Der wärmere Körper ſendet alſo mehr Wärme aus als er empfängt, er verliert alſo Wärme; der weniger warme Körper dagegen empfängt mehr Wärme als er ausſendet und gewinnt daher Wärme.

A und *B* (Fig. 118) ſind zwei Hohlſpiegel, in deren Brennpunkten *a* und *b* zwei Thermometer ſtehen, welche dieſelbe Temperatur wie das Thermometer *c* anzeigen, welches von *a* ebenſo weit entfernt iſt wie *b*. Die drei

Digitized by Google

Thermometer befinden sich also im Strahlungsgleichgewicht. Nun wird das Thermometer *a* durch einen sehr kalten Körper ersetzt. Dann sinkt das Thermometer *b* augenblicklich, während *c* keine merkliche Abkühlung anzeigt. Wie erklärt sich dies, wenn man nicht annehmen will, daß von *a* „Kältestrahlen" ausgehen, die vom Spiegel *B* in *b* vereinigt werden?

Fig. 118.



Erklärung des Pictetschen Spiegelversuchs.

Prevost erklärte die Erscheinung in folgender Weise. Solange zwischen den drei Thermometern Strahlungsgleichgewicht besteht, sendet jedes derselben die gleiche Wärmemenge aus, aber die Strahlung zwischen *a* und *b* ist bedeutend größer als die Strahlung zwischen *a* und *c*. Außer der direkten Strahlung von *a* nach *b* geht nämlich infolge der Spiegelung ein Strahlenkegel von *a* nach *b*. Wenn nun an die Stelle des Thermometers *a* der kalte Körper gebracht wird, so wird der Strahlenkegel viel schwächer, *b* erhält also viel weniger Wärme von *a*, und da *b* immer noch dieselbe Wärmemenge ausstrahlt, muß seine Temperatur sinken. Dagegen übt der kalte Körper auf das Thermometer *c* nur eine geringe Wirkung aus. Dieses erhält nur direkte Strahlen von *a*, tauscht aber mit der übrigen Umgebung, die unverändert geblieben ist, Strahlen aus.

§ 130. Die ersten gründlichen Untersuchungen über die Wärmestrahlung wurden von John Leslie und Graf Rumford ausgeführt.

John Leslie war als Sohn eines armen Tischlers 1766 zu Largo in Schottland geboren. Der Geistliche des Kirchspiels wurde auf den begabten Knaben aufmerksam und sorgte dafür, daß er einigen Unterricht erhielt. Später wurde er vom Earl of Kinnouil unterstützt und kam, 18 Jahre alt, auf die Universität in Edinburg. Hier widmete er sich theologischen, sprachlichen und historischen Studien, da er auf den Wunsch seines Gönners Geistlicher werden sollte. Außerdem beschäftigte er sich aber eifrig mit Mathematik und Physik. Auf diese Weise erhielt er eine sehr vielseitige Ausbildung. Von 1788 bis 1800 unternahm er eine Reise nach Amerika, wo er sich zwei Jahre

Digitized by Google

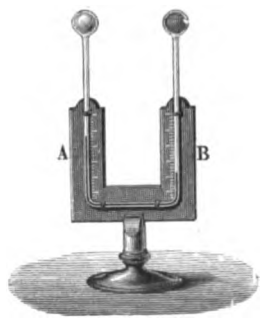
aufhielt, sowie Reisen nach verschiedenen europäischen Ländern. Bereits in den neunziger Jahren beschäftigte er sich mit Untersuchungen über die Wärmestrahlung. Sein erstes Werk über diesen Gegenstand erschien jedoch erst 1804. Im folgenden Jahre wurde er Professor der Mathematik und 1819 Professor der Physik an der Universität in Edinburg. Er lebte unverheiratet und war während der Ferien in der Regel auf Reisen. Nur in seinen letzten Lebensjahren brachte er sie auf seinem Landsitz in der Nähe seines Geburtsortes zu. Hier starb er 1832.

§ 131. Leslie war ein sehr geschickter Experimentator. Zur Untersuchung der Wärmestrahlung konstruierte er namentlich zwei Hilfsmittel, den sog. Leslieschen Würfel und das Differentialthermometer.

Die Umstände, durch welche die Wärmestrahlung eines Körpers bestimmt wird, sind die Temperatur des Körpers, die Gestalt, Größe und Beschaffenheit seiner Oberfläche, sowie die Beschaffenheit des umgebenden Körpers, den die Strahlen durchdringen müssen.

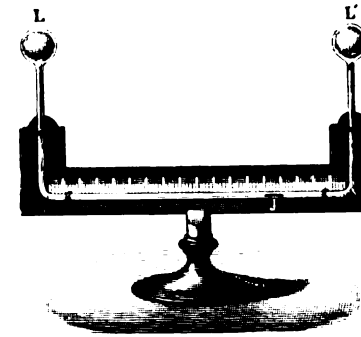
Leslie konnte mit Hilfe seines Würfels untersuchen, wie groß die Ausstrahlung von Oberflächen verschiedener Beschaffenheit ist, wenn die Tem-

Fig. 119.



Leslies Differentialthermometer.

Fig. 120.



Rumfords Differentialthermometer.

peratur, die Form und die Größe dieselbe ist. Der Würfel war hohl und bestand aus Messing. Seine Seitenflächen wurden in verschiedener Weise mit dem Stoffe bekleidet, dessen Wärmestrahlung untersucht werden sollte. Der Würfel wurde mit warmem Wasser gefüllt und vor einen Hohlspiegel gestellt, der die Wärmestrahlen auf der einen Kugel eines Differentialthermometers vereinigte.

Das Differentialthermometer (Fig. 119) hat große Ähnlichkeit mit Schotts geschlossenem Luftthermometer (vgl. § 13), aber Leslie behauptet, das Instrument selbständig konstruiert zu haben. Von dem Schottschen Instrument unterscheidet es sich dadurch, daß es zwei gleich große Kugeln hat und daß die Schenkel des gebogenen Rohres gleich lang sind. Die Flüssigkeit, welche die in den beiden Kugeln enthaltenen Luftmengen voneinander

Digitized by Google

trennt, ist gefärbte Schwefelsäure, eine Flüssigkeit, die sich für diesen Zweck eignet, weil sie nur in sehr geringem Grade verdampft. Die Kugeln hatten einen Durchmesser von ungefähr einem Zoll, und der Apparat war sehr empfindlich.

Auch Graf Rumford behauptet, ein Differentialthermometer konstruiert zu haben, ohne die älteren und wenig abweichenden Formen gekannt zu haben. Er trennte die beiden Luftmengen nicht durch eine lange Flüssigkeitssäule, sondern nur durch einen Tropfen im horizontalen Teil des Verbindungsrohres, und zwar so, daß der Tropfen in der Mitte des Rohres lag, wenn beide Kugeln dieselbe Temperatur hatten (Fig. 120).

Die Differentialthermometer haben bei Untersuchungen über die Wärmestrahlung vor dem gewöhnlichen Thermometer den großen Vorzug, daß die Lufttemperatur auf sie keinen Einfluß hat, da deren Wirkung auf die eine Kugel durch die Wirkung auf die andere Kugel aufgehoben wird. Sie geben erst dann einen Ausschlag, wenn die eine Kugel (die der Wärmestrahlung ausgesetzt wird) eine höhere Temperatur annimmt als die andere. Auch sind diese Thermometer vom Luftdruck unabhängig.

Leslie ließ nun die Strahlen von den verschieden bekleideten Seiten des Würfels auf die eine Kugel des Differentialthermometers fallen und fand die folgenden Zahlen für die Ausstrahlung verschiedener Körper, wenn angenommen wird, daß sich die Strahlenmengen in den einzelnen Fällen wie die am Differentialthermometer beobachteten Temperaturerhöhungen verhalten.

Kienruß	100	Quecksilber	20
Papier	98	Blankes Blei	19
Kronglas	90	Poliertes Eisen	15
Eis	85	Zinn, Silber, Kupfer, Gold .	12

Später hat Melloni (§ 134) die Versuche Leslies mit feineren Instrumenten (§ 137) wiederholt und ähnliche Werte gefunden. So fand er, wenn er die Ausstrahlung von Kienruß gleich 100 setzte, für die Ausstrahlung von blanken Metallflächen 12 (von Silber 3 und von Gold 4), von Bleiweiß 100 und von Schellack 72.

Die Ausstrahlung der Metalle ist in hohem Grade von der Art und Weise abhängig, wie das Metall bearbeitet worden ist. Für Silber, welches von einer Kupferplatte ausgefällt worden ist, ist die Strahlung 5,3, für gewalztes Silber 3 und für poliertes Silber nur 2,1. Je dichter die äußerste Schicht und je glatter (blanker) die Oberfläche beim Hämmern und Polieren wird, desto geringer ist die Ausstrahlung. Will man daher einen Körper gegen Wärmeverlust durch Strahlung schützen, so muß man ihn mit blank poliertem Metall umgeben (vgl. § 53).

Eine geritzte Oberfläche strahlt bedeutend mehr Wärme aus als eine blank polierte.

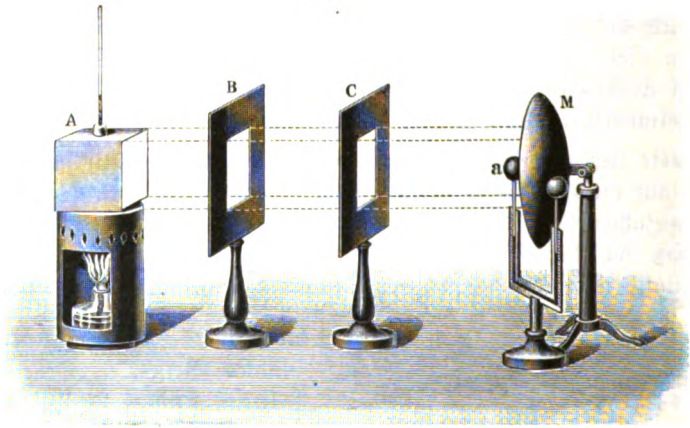
Digitized by Google

§ 132. Es ist offenbar von Interesse, zu wissen, wie dick die Oberflächenschicht ist, welche an der Wärmeausstrahlung teilnimmt. Melloni untersuchte dies in der Weise, daß er eine der polierten Seitenflächen des Leslieschen Würfels gleichförmig mit Firnis bestrich und dann die Strahlung der gefirnißten Fläche ermittelte. Dann wurde eine zweite Schicht Firnis aufgetragen und von neuem die Strahlung ermittelt u. s. w. Das Ergebnis dieser Untersuchung war das folgende:

Anzahl der Schichten	1	2	3	4	5	6	8	10	14	18
Ausstrahlung . . .	9,3	13,9	17,8	21,3	24,5	27,4	32,8	35,8	40,3	40,8.

Beim Auftragen weiterer Firnisschichten blieb die Ausstrahlung unverändert. Die Ausstrahlung nahm also bis zur 18. Schicht zu. Erst mit dieser

Fig. 121.



Leslies Messung des Absorptionsvermögens.

wurde die Firnisschicht so dick, daß die Wärmestrahlung nur von dieser ausging und die Metallfläche keine Rolle mehr spielte. Die 18 Firnisschichten auf der Würfelfläche hatten eine Dicke von 0,04 mm.

Für andere Stoffe hat die ausstrahlende Schicht andere Dicken. So fand Melloni, daß eine Goldfläche Strahlen aus einer Tiefe aussendet, die geringer ist als 0,002 mm.

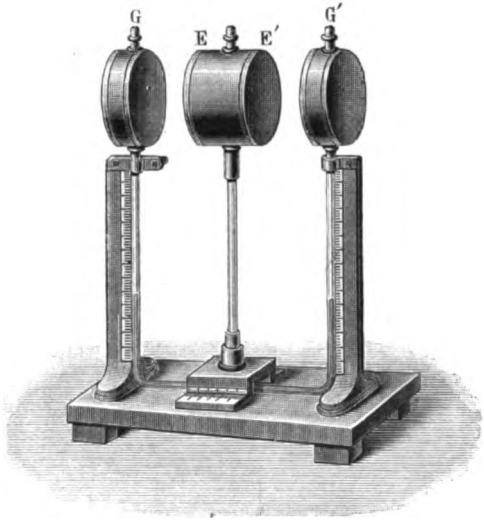
§ 133. Leslie untersuchte auch das Absorptionsvermögen verschiedener Körper für die von seinem Würfel ausgesandten Wärmestrahlen. Er überzog die eine Kugel des Differentialthermometers mit dem Stoff, dessen Absorptionsvermögen gemessen werden sollte, und stellte diese Kugel in den Brennpunkt des Spiegels, der die vom Würfel ausgehenden Strahlen sammelte (Fig. 121). Zwischen dem Würfel (*A*) und dem Spiegel (*M*) wurden zwei Schirme (*B* und *C*) aufgestellt, durch welche das Strahlenbündel abgegrenzt wurde. Das Resultat seiner Untersuchungen war, daß die Stoffe, die ein

Digitized by Google

großes Ausstrahlungsvermögen haben, auch ein großes Absorptionsvermögen haben, während die Stoffe, die wenig Wärme ausstrahlen, auch wenig Wärme einsaugen.

William Ritchie (gest. 1837), der erst Geistlicher war, dann aber Professor der Physik an der Royal Institution wurde, zeigte 1833 durch den folgenden schönen Versuch, daß für ein und denselben Stoff das Ausstrahlungsvermögen gleich dem Absorptionsvermögen ist. GG' (Fig. 122) ist ein Differentialthermometer, dessen Kugeln durch die flachen Zylinder G und G' ersetzt sind. In der Mitte zwischen diesen beiden steht der Zylinder EE', der mit warmem Wasser gefüllt ist und dessen Grundflächen dieselbe Größe haben wie die Grundflächen von G und G'. Die Flächen E und G' sind poliert, E' und G dagegen sind mit Ruß geschwärzt.

Fig. 122.



Ritchies Versuch.

Die Flüssigkeit des Differentialthermometers ließ keine Verschiebung erkennen, ein Beweis dafür, daß die beiden Behälter G und G' gleich stark erwärmt wurden, also dieselbe Wärmemenge aufnahmen. Dies kann aber nur stattfinden, wenn das Verhältnis der Ausstrahlungen an der blanken und an der geschwärzten Fläche dasselbe ist wie das Verhältnis der Absorptionen an diesen Flächen. Setzt man die Ausstrahlung von der geschwärzten Fläche gleich 100, und nimmt man an, daß die Ausstrahlung von der blanken Fläche $^1/_8$ davon ist (vgl. § 130), so muß offenbar auch die Absorption in der geschwärzten Fläche achtmal so groß sein als die Absorption in der blanken Fläche, wenn G und G' gleiche Wärmemengen aufnehmen.

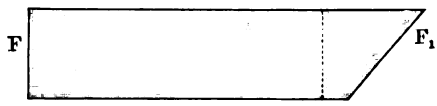
§ 134. Dieses Gesetz über das Verhältnis zwischen der Ausstrahlung und Einsaugung (Emission und Absorption) ist eine einfache Folgerung aus dem Satz vom Strahlungsgleichgewicht. Werden nämlich zwei gleich warme Körper mit parallelen und ebenen Flächen einander gegenübergestellt und der eine Körper strahlt doppelt so viel Wärme aus als der andere, so können die beiden Körper nur dann im Strahlungsgleichgewicht sein, wenn der erste Körper doppelt so viel Wärme einsaugt als der zweite.

Aus dem Satz vom Strahlungsgleichgewicht läßt sich noch ein anderes Gesetz ableiten, welches die Größe der Ausstrahlung nach verschiedenen

Digitized by Google

Richtungen hin angibt. Es seien F und F_1 (Fig. 123) zwei gleich große Flächen von demselben Stoff, die im Strahlungsgleichgewicht sind. Die von F nach F_1 gehenden Strahlen müssen dann notwendigerweise dieselbe Wärmemenge mitführen wie die in der entgegengesetzten Richtung gehenden Strahlen. Anderenfalls würde die Fläche F mehr oder weniger Wärme aufnehmen als sie abgibt und das Gleichgewicht würde gestört sein.

Fig. 123.



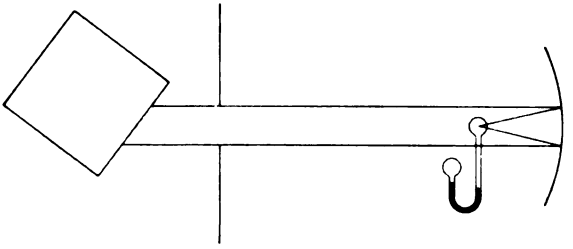
Senkrechte und schiefe Strahlung.

Die Fläche F_1 ist aber größer als F, ferner gehen die Strahlen von F senkrecht zur Fläche, von F_1 dagegen in schiefer Richtung aus. Also ist die Ausstrahlung senkrecht zur strahlenden Fläche größer als in jeder anderen Richtung. Wie aus der Figur zu ersehen ist, hat das von F ausgehende Strahlenbündel denselben Querschnitt wie das von F_1 ausgehende. Man kann daher sagen, daß die Ausstrahlung in einer beliebigen Richtung durch den Querschnitt des betreffenden Strahlenbündels angegeben wird.

Das Ausstrahlungsgesetz ist bereits von Lambert (§ 127) ausgesprochen worden, aber erst Leslie hat die Richtigkeit desselben durch den Versuch bestätigt.

Er ließ die von seinem Würfel ausgehenden Strahlen durch den Spalt eines Schirmes gehen, bevor sie in der gewöhnlichen Weise von einem Hohlspiegel auf die Kugel des Differentialthermometers reflektiert wurden (Fig. 124). Es zeigte sich, daß der Würfel in jeder beliebigen Stellung dieselbe Wirkung auf das Thermometer ausübte. Der Querschnitt des Strahlenbündels ist in allen Fällen gleich dem Durchmesser des Spaltes.

Fig. 124.



Leslies Versuch über das Strahlungsgesetz.

Endlich zeigte Leslie, daß das Spiegelungsgesetz für die Wärmestrahlen ebenso wie für die Lichtstrahlen gilt, und daß Oberflächen, die nur eine geringe Wärmemenge ausstrahlen, die Wärmestrahlen in hohem Grade zurückwerfen, während Oberflächen mit starker Ausstrahlung eine geringe Menge von Wärmestrahlen zurückwerfen.

§ 135. So wertvoll auch Leslies Untersuchungen über die Wärmestrahlen waren, lieferten sie doch keinen entscheidenden Beitrag für das Verständnis der Natur der Strahlen. Dies glückte dagegen dem bereits erwähnten (§ 130) Italiener Macedonio Melloni. Er war 1798 in Parma geboren. Schon in jugendlichem Alter zeigte er großes Interesse für die Naturwissen-

Digitized by Google

schaften und er widmete sich dem Studium dieser Wissenschaften mit solchem Eifer und solchem Erfolge, daß er bereits 1824 als Professor der Physik an der Universität seiner Vaterstadt angestellt wurde. Er war eine ausgeprägt kontemplative Natur, konnte ganze Nächte hindurch einsame Wanderungen unternehmen und hatte Sinn für das Mystische. Dies hat vielleicht dazu beigetragen, daß er die merkwürdigen Wärmestrahlen zum Gegenstand eingehender Untersuchungen machte. Er begann die Veröffentlichung seiner Untersuchung 1831, wurde aber in demselben Jahre wegen politischer Umtriebe des Landes verwiesen. Nach einem kurzen Aufenthalt in Paris, wo er mit Arago bekannt wurde, begab er sich nach Genf, wo damals Pierre Prevost (§ 128) mit seinen Untersuchungen über Wärmestrahlen beschäftigt war. Hier arbeitete er ein halbes Jahr lang. Dann reiste er nach Paris, um in der Akademie über seine Resultate zu berichten. Da er hier jedoch sehr kühl aufgenommen wurde, beschloß er, seine Abhandlung auf eigene Kosten zu veröffentlichen. Die Royal Society verlieh ihm die Rumfordmedaille, und später fanden seine Untersuchungen auch bei der Pariser Akademie die gebührende Anerkennung. Im Jahre 1839 erhielt er die Erlaubnis, nach Italien zurückzukehren. Er wurde Direktor des Konservatoriums der Künste und Gewerbe in Neapel und später (1848) auch Direktor des neu errichteten meteorologischen Observatoriums auf dem Vesuv. Er lebte jetzt ganz seinen wissenschaftlichen Arbeiten, ohne an der Politik irgend welchen Anteil zu nehmen. Trotzdem wurde er im Jahre 1848 stark angegriffen und 1849 sah er sich genötigt, seine Stellung aufzugeben. Er zog sich von aller öffentlichen Tätigkeit zurück und ließ sich in Portici nieder. Hier starb er 1854 an der Cholera.

Fig. 125.

Macedonio Melloni.

§ 136. Bevor wir die Arbeiten Mellonis überblicken, müssen wir uns mit einem Instrument bekannt machen, dessen sich Melloni bei seinen Untersuchungen bediente und ohne welches er seine feinen Messungen nicht hätte ausführen können. Dieses Instrument ist das Nobilische Thermoskop.

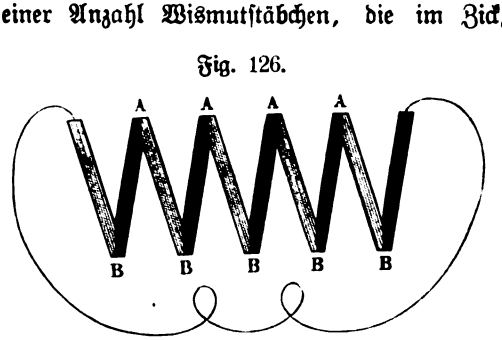
Leopoldo Nobili (1784 bis 1835), ein Freund und Landsmann Mellonis, war Professor in Florenz. Sein Thermoskop ist ein elektrischer

Digitized by Google

Apparat, dessen Wirkungsweise nur verstanden werden kann, wenn man mit gewissen elektrischen Erscheinungen bekannt ist, von denen später ausführlich die Rede sein wird. Hier soll nur eine kurze Beschreibung des Apparates gegeben werden.

Der wichtigste Teil desselben ist in Fig. 126 abgebildet. Er besteht aus einer Anzahl Wismutstäbchen, die im Zickzack mit einer gleichen Anzahl von Antimonstäbchen zusammengelötet sind. Ein Kupferdraht, der das äußerste Wismutstäbchen mit dem äußersten Antimonstäbchen verbindet, bildet eine Schlinge, in welcher eine leicht bewegliche Magnetnadel schwebt. Solange die beiden Reihen von Lötstellen dieselbe Temperatur haben, ist die Magnetnadel in Ruhe. Wenn aber die eine der beiden Reihen, z. B. die untere, erwärmt wird, so entsteht ein elektrischer Strom, der den Draht in der Richtung vom Antimon zum Wismut durchläuft. Durch diesen Strom wird die Magnetnadel aus ihrer Ruhelage abgelenkt, und zwar um so mehr, je stärker der Strom ist, d. h. je größer die Anzahl der Lötstellen ist, und je größer der Temperaturunterschied zwischen den zwei Reihen von Lötstellen ist. Es ist also die ungleiche Erwärmung der Lötstellen der Metallstäbchen, die den elektrischen Strom erzeugt und die Stärke dieses Stromes wird durch die Ablenkung der Magnetnadel gemessen.

Fig. 126.



Thermoelektrische Elemente.

Dreißig Paar zusammengelöteter Metallstäbchen, d. h. 30 thermoelektrische Elemente, die zusammen eine ununterbrochene (zickzackförmige) Metallleitung bilden, werden zu einem Würfel zusammengelegt und in eine Metallkapsel eingeschlossen (Fig. 127), aber so, daß sie sich nicht gegenseitig berühren, sondern durch eine isolierende Schicht (Harz oder Kautschuk) voneinander getrennt sind. Die beiden Gruppen von Lötstellen bilden zwei gegenüberliegende Seiten des Würfels. Von dem äußersten Wismutstäbchen und dem äußersten Antimonstäbchen dieser sog. thermoelektrischen Säule oder Thermosäule geht je ein Kupferdraht nach einem Multiplikator, d. h. einem Apparat, der im wesentlichen aus einer leicht beweglichen Magnetnadel besteht, welche im Innern einer von zahlreichen Windungen gebildeten Drahtrolle schwebt. Dieser Apparat wird später ausführlich erklärt werden.

§ 137. Die Thermosäule bildet in Verbindung mit dem Multiplikator ein außerordentlich empfindliches Differentialthermometer. Der geringste Temperaturunterschied an den beiden Seiten des Würfels, an denen sich die Lötstellen befinden, hat zur Folge, daß in den Windungen des Multiplikators ein elektrischer Strom entsteht, infolgedessen die Magnetnadel ausschlägt.

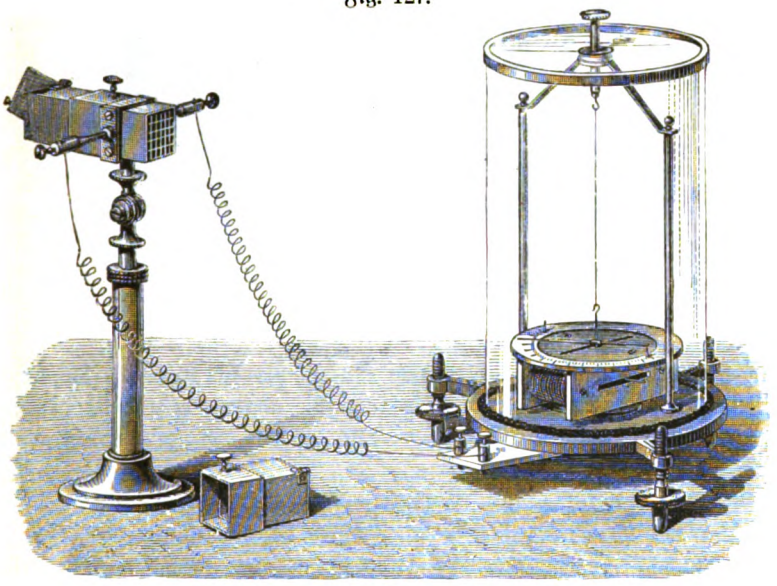
Die Nobilische thermoelektrische Säule eignet sich ganz besonders zu

Digitized by Google

Untersuchungen über die Wärmestrahlung. Die Säule wird so in eine blanke Metallhülse eingeschlossen, daß nur diejenigen beiden Flächen, an denen sich die Lötstellen befinden, frei sind. Auch diejenige Fläche, welche nicht erwärmt werden soll, kann durch Herabdrehen einer Metallplatte bedeckt werden. Die andere Fläche wird mit Ruß geschwärzt, um das Absorptionsvermögen derselben zu steigern.

Nobili und Melloni, die eine Zeitlang gemeinsam arbeiteten, überzeugten sich, daß der Ausschlag der Magnetnadel der Wärmemenge proportional

Fig. 127.



Thermosäule und Multiplikator.

war, die der einen Gruppe von Lötstellen durch Strahlung zugeführt wird, und sie stellten (durch Versuche) eine Tabelle auf, aus der sie unmittelbar die Erwärmung der bestrahlten Fläche ablesen konnten, die einem bestimmten Ausschlag der Magnetnadel entspricht.

Man bekommt eine Vorstellung von der Empfindlichkeit der Thermosäule, wenn man hört, daß die Wärmestrahlung des menschlichen Körpers unter Zuhilfenahme eines Hohlspiegels am Multiplikator einen deutlichen Ausschlag gab, selbst wenn der Körper 50 Fuß von der Säule entfernt war. Bei der Vergleichung der Thermosäule mit einem feinen Luftdifferentialthermometer fand Melloni, daß der Multiplikator einen Ausschlag gab, wenn er siebenmal so weit wie das Luftthermometer entfernt war. Nobili hatte an seinem ersten Instrument nur sechs Paar Metallstäbchen, Melloni erhöhte aber die Anzahl auf 16 Paar.

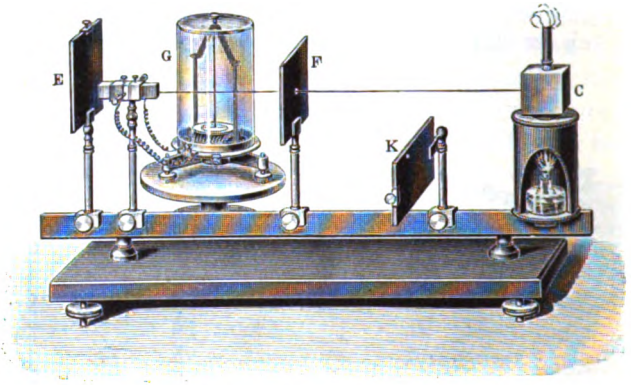
§ 138. Mellonis erste Mitteilung über die Wärmestrahlung erschien

Digitized by Google

1811, und er war mit Unterſuchungen über dieſen Gegenſtand bis zu ſeinem 1854 erfolgten Tode beſchäftigt.

Er wiederholte den Leslieſchen Verſuch über die Ausſtrahlung in der aus Fig. 128 erſichtlichen Weiſe. Die von dem Würfel *C* ausgehenden Strahlen paſſieren eine Öffnung in dem Schirm *F*, ſo daß die Thermoſäule von einem

Fig. 128.



Melloniſcher Apparat.

Strahlenbündel getroffen wird, deſſen Querſchnitt ſo groß wie die Öffnung des Schirmes iſt. Der Schirm *E* beſchützt die abgewendete Seite der Säule vor Beſtrahlung, und der Schirm *K* hält die von der Heizvorrichtung ausgehenden Strahlen zurück.

Von den Unterſuchungen Mellonis ſind beſonders diejenigen über die Durchläſſigkeit der Körper für Wärmeſtrahlen (Diathermanie) hervorzuheben.

F. W. Herſchel hatte bereits 1800 intereſſante Beobachtungen über die Verteilung der Wärme im Sonnenſpektrum gemacht. Er ſtellte ein ſehr empfindliches Thermometer in jede der ſieben Hauptfarben des Spektrums und fand, daß die Wärmewirkung am ſtärkſten im Rot iſt und gegen das violette Ende des Spektrums hin abnimmt. Aber zugleich fand er, daß das Thermometer über das rote Ende hinaus noch höher ſteigt als in den ſichtbaren roten Strahlen. Die Beobachtungen Herſchels werden durch Fig. 129 veranſchaulicht. *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F*, *G* und *H* ſind die Fraunhoferſchen Linien des Sonnenſpektrums, und die Kurve über dem Spektrum gibt die Wärmewirkung in den verſchiedenen Teilen des Spektrums an. Die Wärme ſteigt von Violett (*H*) bis Rot (*A*) und über das rote Ende des ſichtbaren Spektrums hinaus, nimmt aber dann ſchnell ab.

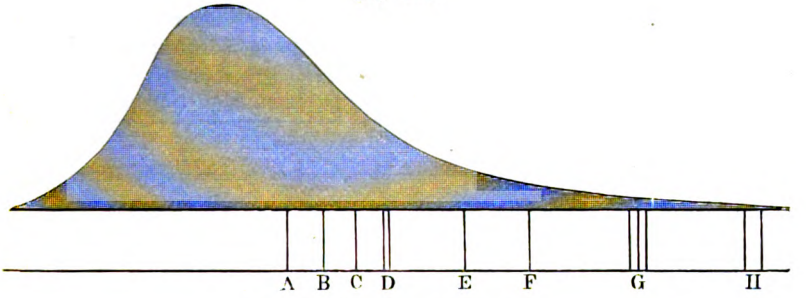
Dies war etwas ganz neues, und Herſchel glaubte in dieſer Erſcheinung einen Beweis dafür zu ſehen, daß die dunkeln Wärmeſtrahlen nach demſelben Geſetze gebrochen werden wie die ſichtbaren Lichtſtrahlen. Er fand für ſeine Auffaſſung einen treffenden Ausdruck, indem er ſagte, „daß alle Strahlen im Sonnenlicht, die wie die farbigen Strahlen gebrochen werden, auf das Auge

Digitized by Google

als Licht wirken, während die weniger brechbaren, d. h. die über das rote Ende hinaus liegenden, von der Feuchtigkeit des Auges und der Haut eingesogen werden und die Empfindung der Wärme hervorbringen".

John Leslie bestritt auf das entschiedenste die Behauptung Herschels, daß das „Wärmespektrum" länger als das „Lichtspektrum" sei, und namentlich bekämpfte er die Ansicht Herschels, daß sich die dunkeln Wärmestrahlen von

Fig. 129.



Herschels Wärmespektrum.

den Lichtstrahlen nur dadurch unterscheiden, daß sie in geringerem Grade gebrochen werden. Leslie erklärte die Wärmewirkung außerhalb des roten Endes des Spektrums durch die Annahme, daß sich die Wärme der roten Strahlen der Luft mitteilt. Die Versuche Herschels wurden von verschiedenen Physikern wiederholt. Sie fanden zwar alle, daß die Wärmewirkung über das sichtbare Spektrum hinausgeht, aber ihre Angaben über die Stelle, an der die Erwärmung am stärksten ist, waren wenig übereinstimmend. Erst Seebeck erkannte, daß diese Abweichungen ihren Grund darin hatten, daß zur Erzeugung des Spektrums Prismen von verschiedenen Glasarten benutzt wurden. Für die eine Glasart lag die Stelle der stärksten Erwärmung im Rot, für andere dagegen im Gelb. In allen prismatischen Farbenbildern, sagt Seebeck in seiner Abhandlnng vom Jahre 1819, findet Wärmewirkung statt, die vom violetten Ende nach dem roten Ende hin zunimmt. Bei einigen Prismen liegt die Stelle der stärksten Erwärmung im Rot, bei Kronglas und bei gewöhnlichem weichem Glas im Gelb, bei Prismen aus Flintglas außerhalb des Rot, aber bei allen Prismen ist auch über das rote Ende hinaus Wärmewirkung nachzuweisen. Seebeck wußte auch, daß über das violette Ende des Spektrums hinaus ebenfalls Strahlen vorhanden sind, die allerdings nur eine verschwindende Wärmewirkung, dagegen eine starke chemische Wirkung ausüben.

§ 139. Melloni führte seine ersten Versuche über den Gang der Wärmestrahlen durch Körper in der Weise aus, daß er die verschiedenen Farben des durch ein Kronglasprisma erzeugten Sonnenspektrums auf die Thermosäule fallen ließ. Er wählte sieben Stellen des Spektrums, die den sieben Hauptfarben entsprachen, und suchte in der Verlängerung des Spektrums die-

Digitized by Google

jenigen Stellen, an denen dieselbe Temperatur herrschte wie an den im sichtbaren Spektrum gewählten Stellen. Dann schaltete er zwischen das Prisma und die Thermosäule eine von zwei Glasplatten begrenzte Wasserschicht von 1 mm Dicke ein und beobachtete von neuem den Ausschlag der Multiplikatornadel für dieselben Strahlen. Das Ergebnis dieser Messungen war folgendes.

	Ausschlag der Nadel		Verlust
	ohne Einschaltung der Wasserschicht	mit Einschaltung der Wasserschicht	
Violett	2	2	0
Indigo	5	4,5	0,10
Blau	9	8	0,11
Grün	12	10	0,17
Gelb	25	20	0,20
Orange	29	21	0,27
Rot	32	20	0,37
Stellen im unsichtbaren (ultraroten) Spektrum	29	14	0,52
	25	9	0,64
	12	3	0,75
	9	1	0,88
	5	0,5	0,90
	2	0	1,00

Die Zahlen für den „Verlust" geben an, welcher Teil der Wärmestrahlen in der Wasserschicht verloren ging. Man muß sich erinnern (§ 137), daß der Ausschlag der Multiplikatornadel in einem bekannten Verhältnis zu der Wärme steht, die durch die Strahlen der Thermosäule zugeführt wird.

Aus der Tabelle ist zu ersehen, daß es verschiedene Wärmestrahlen gibt und daß sie in verschiedenem Grade durch die dünne Wasserschicht hindurchgehen. Die violetten Strahlen gehen ungeschwächt durch, aber für die anderen Strahlen ist die Durchlässigkeit des Wassers geringer, und zwar um so mehr, je näher die Strahlen dem roten Ende des Spektrums liegen. Für Strahlen, die jenseit des roten Endes des Spektrums liegen, wird das Wasser schließlich für die Strahlen undurchlässig.

§ 140. Bei seinen weiteren Untersuchungen fand Melloni ferner, daß die verschiedenen Körper, wie für Lichtstrahlen, so auch für Wärmestrahlen in sehr verschiedenem Grade durchlässig sind. Mit Rücksicht auf das Licht zerfallen die Körper zunächst in durchsichtige und undurchsichtige. Aber auch für verschiedene Farben ist die Durchlässigkeit der Körper sehr verschieden. Rotes Glas läßt nur rote Strahlen und blaues Glas nur blaue Strahlen durch. Melloni zeigte, daß in ähnlicher Weise die Körper auch eine bestimmte „Wärmefarbe" besitzen, d. h. daß sie verschiedene (d. h. ungleich brechbare) Wärmestrahlen in ungleichem Grade durchlassen.

Digitized by Google

Um ungleich stark brechbare Wärmestrahlen zu erzeugen, benutzte Melloni vier verschiedene Wärmequellen: eine stark leuchtende Lampenflamme (Locatellische Lampe), einen Platindraht, der durch eine Spiritusflamme zum Glühen gebracht wurde, eine auf 390° C erwärmte Kupferplatte und die geschwärzte Fläche eines mit siedendem Wasser gefüllten Leslieschen Würfels.

Von der Locatellischen Lampe und von der Platinspirale gingen sowohl helle als dunkle Strahlen aus, von der Kupferplatte und der Würfelfläche dagegen nur dunkle.

Melloni ermittelte nun durch genaue Versuche, wieviel Prozent der Strahlen dieser vier Wärmequellen durch verschiedene Körper hindurchgingen, aus denen Platten von gleicher Dicke geschliffen waren.

Einige von seinen Resultaten sind die folgenden:

	Locatellische Lampe	Glühendes Platin	Kupferplatte 390°	Würfelfläche 100°
Steinsalz (2,6 mm dick)	92	92	92	92
Spiegelglas (2,6 mm dick)	39	24	6	0
Rauchtopas (2,6 mm dick)	37	28	6	0
Eis (2 mm dick)	6	0	0	0

Auch die Durchlässigkeit von Flüssigkeiten wurde untersucht. Da sich diese zwischen Glasplatten befanden, konnte nur die Locatellische Lampe als Wärmequelle benutzt werden, da die Strahlen der anderen Quellen in zu hohem Grade vom Glase absorbiert wurden. Die Dicke der Flüssigkeitsschicht war 9,2 mm.

Schwefelkohlenstoff	63
Chlorschwefel	63
Terpentinöl	31
Destilliertes Wasser	11.

Aus diesen Messungen geht deutlich hervor, daß ein hoher Grad von Durchsichtigkeit durchaus nicht auf einen hohen Grad von Durchlässigkeit für Wärmestrahlen schließen läßt. Klares Glas und vollständig durchsichtiges Eis lassen von der am wenigsten warmen Strahlenquelle gar nichts durch, und anderseits ist der dunkelbraune Chlorschwefel für Wärmestrahlen in weit höherem Grade durchlässig als das klare farblose Wasser. Melloni fand nur einen Körper, der für die verschiedenen Wärmestrahlen in gleichem Grade durchlässig ist. Dieser Körper ist das Steinsalz. Durch die Steinsalzplatte gingen immer 92 Proz. der Wärmestrahlen hindurch, einerlei ob sie von einer leuchtenden oder nichtleuchtenden Wärmequelle ausgesandt wurden. Ebenso wie das Steinsalz (Natriumchlorid) hat auch der Sylvin (Kaliumchlorid) eine

Digitized by Google

weiße „Wärmefarbe", d. h. er läßt von allen Wärmestrahlen gleiche Mengen durch. In der Regel sind übrigens die klaren und farblosen Körper am durchlässigsten für die „wärmsten" Strahlen, die am stärksten gebrochen werden, weniger durchlässig für die „kälteren" Strahlen, d. h. diejenigen, welche weniger stark gebrochen werden. Aber die Durchlässigkeit ist verschieden für die verschiedenen Strahlen. Jeder Körper wählt sich gewisse Strahlen aus, die er einsaugt, ebenso wie grünes Glas alle Lichtstrahlen mit Ausnahme der grünen einsaugt. Jeder Körper hat sozusagen eine bestimmte „Wärmefarbe".

§ 141. Melloni untersuchte ferner den Einfluß der Dicke der Platte und fand, wie zu erwarten war, daß umsomehr Strahlen absorbiert werden, je dicker die Platte ist, aber keineswegs so, daß die Durchlässigkeit in demselben Verhältnis abnimmt wie die Dicke zunimmt. Wenn die Strahlen durch eine Platte hindurchgegangen waren, so ging ein viel höherer Prozentsatz durch eine zweite Platte hindurch. Dies hängt mit der „Wärmefarbe" zusammen. Wenn nämlich die verschiedenen Strahlen auf die erste Platte fallen, so werden in dieser diejenigen Strahlen absorbiert, die nicht zu der Farbe des Körpers gehören, und nur die Strahlen von der Farbe des Körpers gehen durch die Platte hindurch. Wenn dann diese einfarbigen Strahlen eine zweite Platte von derselben Art treffen, so findet natürlich eine viel geringere Absorption statt. Ganz ohne Absorption gehen sie allerdings auch durch die zweite Platte nicht hindurch.

Hiermit war auch die Erklärung für die Beobachtung Seebecks und anderer Physiker gegeben, daß die stärkste Wärmewirkung im Spektrum bald im Gelb, bald im Rot, oder außerhalb des sichtbaren Spektrums beobachtet wird, da dies davon abhängt, welche „Wärmefarbe" das benutzte Prisma hat.

§ 142. Tyndall hat gefunden, daß eine Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff vollständig undurchsichtig, aber in hohem Grade für dunkle Strahlen durchlässig ist, und er hat eine solche Lösung benutzt, um zu ermitteln, wieviel helle und wieviel dunkle Strahlen von verschiedenen Wärmequellen ausgesandt werden. Ein Gefäß aus Steinsalz mit parallelen Wänden wurde mit reinem Schwefelkohlenstoff gefüllt. Die Wärmestrahlen passierten, bevor sie die Thermosäule trafen, den Schwefelkohlenstoff. Nachdem der Ausschlag der Multiplikatornadel beobachtet worden war, wurde der Schwefelkohlenstoff durch die Jodlösung ersetzt und von neuem der Ausschlag der Nadel beobachtet. Es ergab sich, daß die meisten Strahlen, die von den gewöhnlichen Lichtquellen ausgesandt werden, dunkle sind.

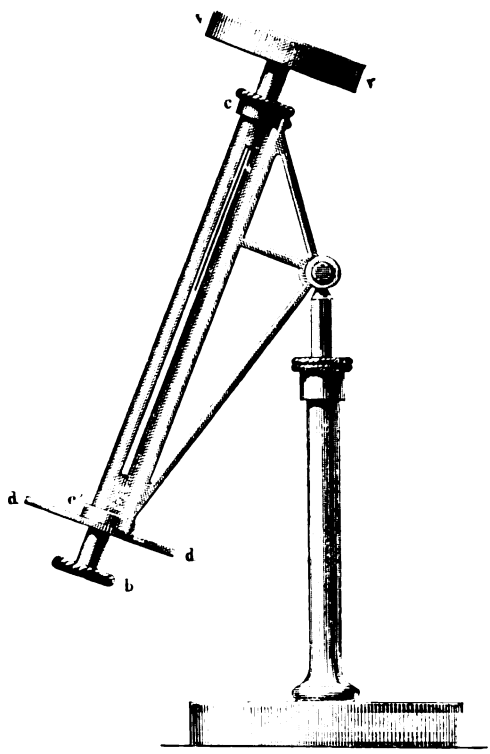
Wärmequelle	Helle Strahlen	Dunkle Strahlen
Geschwärzte Metallfläche, 100° C	0	100
Rotglühende Platinspirale	0	100
Ölflamme	3	97
Gasflamme	4	96
Elektrisches Licht	11	89

Digitized by Google

Die Strahlenwirkung besteht also selbst bei unseren stärksten Lichtquellen wesentlich aus dunkeln Strahlen.

§ 143. Es ist ohne Zweifel eine Frage von besonderem Interesse, welche Wärmemenge der Erde durch die Sonnenstrahlen zugeführt wird und wieviele von diesen Strahlen helle und wieviele dunkle sind. In der Thermosäule hat man für eine derartige Messung ein hinreichend feines Thermometer, und aus Steinsalz lassen sich Prismen schleifen, die für die verschiedenen Strahlen in gleichem Grade durchlässig sind. Aber eine große Schwierigkeit liegt darin, daß die Sonnenstrahlen die Atmosphäre und den in derselben enthaltenen Wasserdampf passieren müssen, bevor sie die Erdoberfläche treffen.

Fig. 130.



Pouillets Pyrheliometer.

Tyndall hat die absorbierende Wirkung, welche verschiedene Luftarten auf Wärmestrahlen ausüben, gemessen und gefunden, daß atmosphärische Luft, Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff so gut wie gar keine Wärmestrahlen absorbieren, die von einem Körper kommen, der wärmer als 100° C ist. Andere Luftarten dagegen, z. B. Ammoniak, absorbieren derartige Strahlen in merklicher Menge. Das Absorptionsvermögen von Dämpfen entspricht, wie Tyndall fand, dem Absorptionsvermögen der betreffenden Flüssigkeiten. Da das Wasser für Wärmestrahlen wenig durchlässig ist (vgl. § 140), absorbiert der Wasserdampf die Wärmestrahlen in merklicher Menge. Zuverlässige Messungen oder Berechnungen der absorbierenden Wirkung, welche die Atmosphäre auf die Sonnenstrahlen ausübt, liegen jedoch bis jetzt nicht vor.

§ 144. Dagegen sind zahlreiche Messungen der Wärme, die der Erdoberfläche durch die Sonnenstrahlen zugeführt werden, ausgeführt worden.

Die ersten Versuche dieser Art wurden 1729 von Bouguer ausgeführt, und später beschäftigten sich Lambert und Leslie mit dieser Frage. Einigermaßen genaue Resultate wurden jedoch erst von Claude Pouillet (1790 bis 1868) erzielt. Er bediente sich bei seinen Untersuchungen des sogenannten

Digitized by Google

Pyrheliometers (Fig. 130 a. v. S.). Der wesentliche Teil dieses Apparates war ein flacher Zylinder *V* von Silberblech, der mit 100 *g* Wasser gefüllt wurde. In diesem Wasserbehälter befand sich die Kugel eines Thermometers, dessen Röhre in die Metallröhre *cc'* eingeschlossen ist. Die letztere war lose in eine Hülse eingelassen, so daß man durch Drehen das Wasser mischen und die Temperatur desselben gleichförmig halten konnte. Pouillet ließ nun die Sonnenstrahlen senkrecht auf die geschwärzte Grundfläche des Zylinders fallen. Um den Zylinder in die richtige Lage zu bringen, wurde er so gestellt, daß der Schatten des Zylinders mit dem Schatten einer kreisförmigen Scheibe zusammenfiel, die am anderen Ende der Röhre angebracht war und die denselben Durchmesser wie der Zylinder hatte.

Wenn der Versuch beginnt, ist der Zylinder durch einen Schirm gegen die Einwirkung der Sonnenstrahlen geschützt und man beobachtet fünf Minuten lang den Gang des Thermometers. Dann wird der Schirm fünf Minuten lang entfernt und ebenfalls der Gang des Thermometers beobachtet. Endlich wird der Schirm wieder vorgeschoben und der Gang des Thermometers nochmals fünf Minuten lang beobachtet. Aus den drei Beobachtungen läßt sich dann die Erwärmung, welche das Wasser durch die Einwirkung der Sonnenstrahlen erfahren hat, berechnen. Die erste und die dritte Beobachtung dienen dazu, den Einfluß der Umgebung während der mittleren Periode zu bestimmen.

Pouillet fand, wie zu erwarten war, daß die absorbierende Wirkung der Atmosphäre zu verschiedenen Tageszeiten sehr verschieden ist. Morgens und abends, wenn die Sonne tief am Himmel steht, müssen die Strahlen eine viel dickere Luftschicht durchlaufen als mittags, wenn die Sonne hoch steht.

Das Thermometer des Pyrheliometers stieg in fünf Minuten um

12	1	2	3	4	5	6 Uhr
4,8°	4,7°	4,6°	4,3°	3,9°	3,2°	2,0°.

Pouillet fand aus diesen Beobachtungen für die Sonnenkonstante, d. h. die Wärmemenge, welche eine geschwärzte Fläche von 1 qcm in einer Minute aufnimmt, wenn sie von den Sonnenstrahlen senkrecht getroffen wird, 1,76 Grammkalorien. Dieser Wert ist jedoch zu klein. Aus späteren Beobachtungen hat sich ergeben, daß er ungefähr gleich 3 ist. Die Fläche eines Quadratzentimeters, welche senkrecht von den Sonnenstrahlen getroffen wird, erhält im Laufe eines Jahres $3 . 60 . 24 . 365^1/_4 = 1\,600\,000$ Grammkalorien. Diese Wärmemenge würde 20 000 *g* Eis schmelzen können. Das entstehende Wasser würde eine Säule von 200 m bilden. Fragt man nun nach der Wärmemenge, welche der gesamten Oberfläche der Erde von den Sonnenstrahlen zugeführt wird, so muß man bedenken, daß immer nur die Hälfte der Oberfläche von der Sonne beschienen wird und daß die Sonnenstrahlen auf den größten Teil der beschienenen Fläche schief auffallen. In Wirklichkeit kommt auf die Erdoberfläche nur diejenige Sonnenwärme, die auf eine Kreisfläche vom Umfange des Äquators kommen würde, wenn sie von den

Digitized by Google

Sonnenstrahlen senkrecht getroffen würde. Diese gesamte Wärmemenge wird aber nicht von der Erde eingesogen, denn die Oberfläche ist ja nicht geschwärzt und besitzt daher ein viel geringeres Absorptionsvermögen, als bei dieser Berechnung vorausgesetzt ist. Wie groß die wirklich aufgenommene Wärmemenge ist, weiß man nicht. Da sich aber die mittlere Temperatur der Erde (ungefähr 15° C) von Jahr zu Jahr unverändert hält, muß die Sonnenwärme wieder in den Himmelsraum ausstrahlen.

§ 145. Die Annahme Herschels über das Verhältnis zwischen den Lichtstrahlen und den dunkeln Wärmestrahlen (§ 137) fand durch die Untersuchungen Mellonis ihre volle Bestätigung. Der Unterschied zwischen den beiden Arten von Strahlen ist nur der, daß die Lichtstrahlen stärker gebrochen werden als die dunkeln Strahlen. Ja mit Hilfe eines Steinsalzprismas erhielt Melloni ein Spektrum, welches sich über die beiden Enden des sichtbaren Spektrums hinaus verlängerte, was auch Seebeck (§ 138) bereits beobachtet hatte. Die Strahlen, aus denen das sichtbare Spektrum besteht, bilden also nur einen Teil der Strahlen, die ein erhitzter Körper aussendet. Alle Strahlen, sowohl die leuchtenden als auch die nichtleuchtenden, befolgen das Spiegelungsgesetz, und wenn sie aus einem Körper in einen anderen übergehen, zeigen die einen dasselbe Verhalten wie die anderen. Die hellen und die dunkeln Strahlen werden allerdings ungleich stark gebrochen, aber auch die hellen Strahlen von verschiedener Farbe werden in ungleichem Grade gebrochen. Die hellen und die dunkeln Strahlen werden von ein und demselben Körper in verschiedenem Grade absorbiert, aber dasselbe Verhalten zeigen auch die sichtbaren Strahlen von verschiedener Farbe. Die Eigenschaften der hellen und der dunkeln Strahlen sind nur dem Grade nach, nicht dem Wesen nach voneinander verschieden, ebenso wie die Eigenschaften der hellen Strahlen von verschiedener Farbe. Dazu kommt, daß man später noch andere übereinstimmende Eigenschaften der hellen und dunkeln Strahlen aufgefunden hat. Sie interferieren wie die Lichtstrahlen und lassen sich ebenso wie diese polarisieren.

Die Untersuchungen Mellonis und anderer Forscher haben also den Beweis geliefert, daß zwischen den Wärmestrahlen und den Lichtstrahlen kein wesentlicher Unterschied besteht. Sie bilden zusammen eine Skala von Strahlen, die sich untereinander dadurch unterscheiden, daß sie beim Hindurchgehen durch einen Körper in verschiedenem Grade gebrochen und in verschiedenem Grade absorbiert werden.

Da nun seit dem Erscheinen von Fresnels epochemachenden Arbeiten (1818) angenommen wird, daß die Lichtstrahlen in einer Wellenbewegung im Äther bestehen, so war man genötigt, dieselbe Annahme auch für die Wärmestrahlen zu machen. Man war so zu der Erkenntnis gekommen, daß weder die Lichtstrahlen noch auch die Wärmestrahlen aus materiellen Teilchen bestehen, die von der Lichtquelle oder der Wärmequelle ausgesandt werden. Hiermit hatte die Theorie, daß die Wärme ein Stoff sei, einen schweren

Digitized by Google

Stoß, dagegen die Annahme Rumfords, daß sie eine Art Bewegung sei, eine mächtige Stütze bekommen. Es dauerte aber noch lange, bis diese Ansicht allgemeine Anerkennung fand.

Wärmeleitung.

§ 146. Wenn eine Wassermasse oder Luftmasse nicht überall dieselbe Temperatur hat, so treten infolge dieser Temperaturverschiedenheit in der Regel Strömungen auf, indem die wärmeren Teile nach oben steigen und die kälteren nach unten sinken. In einem festen Körper kann eine ungleiche Erwärmung keine Strömung hervorbringen, weil die Teilchen durch die Kohäsionskraft zusammengehalten werden, die nicht überwunden wird, bevor die Erwärmung den Schmelzpunkt erreicht hat. Wenn aber einige Teile eines festen Körpers eine höhere Temperatur annehmen als die übrigen, so ist das Wärmegleichgewicht in diesem Körper gestört, und die Wärme sucht den Temperaturunterschied auszugleichen, indem sie von den wärmeren Teilen nach den kälteren hinströmt. Die Wärme wird dann von dem einen Massenteilchen zu dem anderen geleitet, und die Zeit, welche die Wärme braucht, um sich in dem Körper um 1 cm fortzubewegen, hängt von der Natur des Körpers und von der Größe des Temperaturunterschiedes an der betreffenden Strecke ab. Die Erfahrung lehrt, daß die Wärmemenge, die in einer Sekunde in einem Körper um 1 cm fortgeleitet wird, in demselben Verhältnis wie der Temperaturunterschied zunimmt. Wenn z. B. dieser Unterschied in einem Falle 3°, in einem anderen Falle dagegen $1^1/_2{}^0$ ist, so wird im ersteren Falle die doppelte Wärmemenge fortgeleitet. Aber von verschiedenen Körpern werden auch bei gleichem Temperaturunterschied sehr verschiedene Wärmemengen geleitet. Jeder Körper hat ein bestimmtes Wärmeleitungsvermögen, das durch die Wärmemenge gemessen wird, die in dem betreffenden Körper in einer Sekunde durch 1 qcm hindurchgeht, wenn der Temperaturunterschied an zwei um 1 cm voneinander entfernten Punkten der Leitungsstrecke 1° C ist.

Die Erscheinungen der Wärmeleitung sind im allgemeinen ebenso bekannt wie die Erscheinungen der Wärmestrahlung. Aber die Einzelheiten der Erscheinung können nur durch sehr feine Untersuchungen aufgeklärt werden, die mit großen Schwierigkeiten verbunden sind.

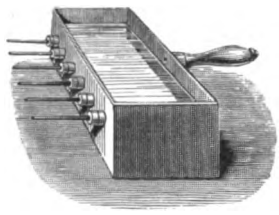
§ 147. Professor Richmann (geb. 1711 in Pernau, gest. 1753 in Petersburg) glaubte das Wärmeleitungsvermögen der verschiedenen Körper in der Weise bestimmen zu können, daß er gleich große Kugeln auf dieselbe Temperatur erwärmte und dann beobachtete, welches Metall sich am schnellsten

Digitized by Google

abkühlte. Er fand, daß das Blei die Wärme am schnellsten abgab, und er hielt daher das Blei für den besten Wärmeleiter. Es ist jedoch leicht einzusehen, daß der Versuch Richmanns nicht zur Bestimmung des Wärmeleitungsvermögens führen konnte. Erstens erfolgte die Abkühlung durch Ausstrahlung, und diese ist in hohem Grade von der Beschaffenheit der Oberfläche abhängig. Dann aber enthielten die gleich großen und gleich warmen Metallkugeln ungleich große Wärmemengen. Daher entspricht eine gleich große Abkühlung einer Bleikugel und einer Eisenkugel keineswegs einem gleich großen Wärmeverlust, da die spezifischen Wärmen des Bleies und des Eisens verschieden sind (vergl. § 54).

Benjamin Franklin schlug vor, das Wärmeleitungsvermögen von Metallstäben dadurch zu messen, daß man beobachtet, wie schnell die Wärme in einem Metallstabe vordringt und eine Wachsschicht schmilzt, mit der der Stab überzogen ist. Der Holländer Jan Ingenhouß konstruierte einen Apparat, vermittelst dessen diese Messungen ausgeführt werden konnten. Er besteht aus einem Blechkasten (Fig. 131), der mit warmem Wasser oder Öl gefüllt wird. In eine Anzahl von Öffnungen der Wand dieses Kastens sind Metallstäbe eingesetzt, die mit einer Wachsschicht überzogen werden. Während sich die Metallstäbe erwärmen, schmilzt das Wachs, und Franklin glaubte, je länger die in einer bestimmten Zeit geschmolzene Wachsschicht sei, desto besser leite das Metall die Wärme.

Fig. 131.



Ingenhoußscher Apparat.

Dies Verfahren zur Ermittelung des Wärmeleitungsvermögens ist ohne Zweifel besser als das Richmannsche, allein auch dieser Versuch ist weit davon entfernt, ein „reiner" zu sein. Er leidet an demselben Fehler wie der Richmannsche Versuch, d. h. auch bei ihm ist weder auf die Ausstrahlung noch auf die spezifische Wärme Rücksicht genommen.

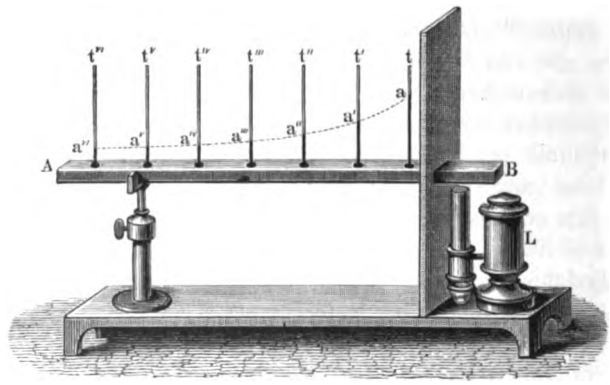
§ 148. Die Ausführung eines „reinen" Versuches erfordert große Umsicht und große Geschicklichkeit. Alle Erscheinungen, die bei dem Versuche in Betracht kommen, müssen genau erwogen werden, bevor der Versuch mit allen erforderlichen Vorsichtsmaßregeln ausgeführt werden kann. Lambert (vergl. § 127) hat sich in seiner Schrift aus dem Jahre 1778 sehr klar darüber ausgesprochen, was in einem Eisenstabe vor sich geht, der an dem einen Ende erhitzt wird. Er schreibt: „Der Stab wird nur an dem einen Ende erhitzt. Allein die Wärme geht nach und nach auch in die entfernteren Teile des Stabes und aus diesen (durch Strahlung und durch Leitung) in die Luft über. Hat die Flamme hinreichend lange mit derselben Stärke gebrannt, so hat jeder Teil des Stabes seine bestimmte Temperatur angenommen, indem dann jeder Teil von den anstoßenden Teilchen, die der Flamme näher liegen, ebensoviel Wärme empfängt, als er an die entfernteren Teile, sowie an die Luft abgibt." Dies ist natürlich nicht das Ergebnis eines Versuches, den Lambert ausgeführt hat, sondern ein rein logischer Schluß. Der Stab

Digitized by Google

muß in einen stationären Wärmezustand kommen. Die Erwärmung der einzelnen Teile kann nämlich nur eine gewisse Größe erreichen, und wenn der stationäre Zustand erreicht ist, muß die Wärmemenge, die ein beliebiger Teil des Stabes empfängt, ebenso groß sein wie die Wärmemenge, die dieser Teil in derselben Zeit an die benachbarten Teile und an die Luft abgibt. Andernfalls würde seine Temperatur entweder steigen oder fallen, der Zustand also nicht stationär sein.

Die von Lambert selbst ausgeführten Versuche bieten wenig Interesse. Erst 24 Jahre später, also im Jahre 1804, veröffentlichte Jean Baptiste Biot (1774 bis 1862) eine Abhandlung, in der er über eine Reihe von Versuchen berichtet, durch die er ermittelt hatte, wie die Wärme in einem Stabe verteilt ist, wenn der stationäre Zustand erreicht ist. Der zu diesen Versuchen benutzte Apparat ist in Fig. 132 abgebildet. AB ist der Metallstab, der

Fig. 132.



Biots Messung der Wärmeleitung.

untersucht werden soll. Das eine Ende des Stabes wird durch die Flamme einer gleichmäßig brennenden Lampe erwärmt, während der übrige Teil des Stabes durch einen Schirm vor der Einwirkung der Wärmequelle geschützt wird. Eine Anzahl von Vertiefungen, die in gleichen Abständen in den Stab gebohrt waren, dienten zur Aufnahme von etwas Quecksilber, in welches die Kugeln empfindlicher Thermometer eingetaucht wurden. Nachdem der stationäre Zustand eingetreten war, wurden die von den Thermometern angezeigten Temperaturen abgelesen. Hieraus ergab sich die in der Figur gezeichnete „Temperaturkurve", welche das Gesetz, nach welchem die Temperatur in dem Stabe abnimmt, zum Ausdruck bringt.

§ 149. Das Gesagte gilt für alle Metallstäbe, die sich im stationären Zustande befinden. Wenn aber der Versuch mit Stäben aus verschiedenen Metallen ausgeführt wird, so zeigt jedes Metall auch bei gleichen Dimensionen der Stäbe eine Kurve von anderer Form.

Wenn sich nämlich der Stab im stationären Zustande befindet, so muß

Digitized by Google

sämtliche Wärme, die dem Stabe von der Wärmequelle zugeführt wird, teils durch Leitung, teils durch Strahlung an die Luft abgegeben werden. Gibt man nun den verschiedenen Metallstäben dieselbe Form und versilbert die Oberflächen, so bieten sie sämtlich für die äußere Wärmeleitung dieselben Bedingungen. Wenn also die innere Leitung bei den verschiedenen Metallen mehr oder weniger vollkommen ist, so muß sich dies dadurch bemerkbar machen, daß der Unterschied der Temperaturen an den Enden des Stabes kleiner oder größer ist, je nachdem das Metall die Wärme mehr oder weniger gut leitet. Denkt man sich nämlich, die Thermometer zeigten bei allen Metallen dieselbe Temperatur an, so müßte, da die äußere Leitung in allen Fällen dieselbe ist, auch die innere dieselbe sein, d. h. alle Metalle müßten die Wärme gleich gut leiten. — Eine Verschiedenheit des Wärmeleitungsvermögens muß also zu einer Verschiedenheit in den Angaben der Thermometer führen, und selbstverständlich wird ein schlechter Leiter eine geringere Wärmemenge in dem Stabe fortführen und also einen niedrigeren Thermometerstand hervorbringen.

Ein näheres Eingehen auf die Wärmeleitungsversuche ist ohne Hilfe der Mathematik nicht möglich. Aber das Gesagte genügt, um zu erkennen, daß es durch den stationären Zustand ermöglicht wird, das Wärmeleitungsvermögen verschiedener Metalle zu vergleichen.

Bei neueren Versuchen über das Wärmeleitungsvermögen der Metalle wurden die Thermometer durch die bedeutend empfindlicheren thermoelektrischen Elemente ersetzt. Sehr genaue Bestimmungen wurden von dem dänischen Physiker L. Lorenz (1829 bis 1891) ausgeführt.

Setzt man das Wärmeleitungsvermögen des Silbers gleich 100, so wird das Leitungsvermögen einiger anderer Metalle durch die folgenden Zahlen angegeben:

Kupfer	74	Eisen	12
Gold	53	Blei	9
Messing	23	Platin	9
Zink	19	Wismut	2
Zinn	15		

Feste Körper leiten die Wärme besser als Flüssigkeiten und Gase, und unter den festen Körpern sind die besten Wärmeleiter die Metalle. Einzelne Kristalle, z. B. Bergkristall und Steinsalz, leiten die Wärme ebenso gut wie Blei. — Holz, Stroh, Seide, Wolle (überhaupt organische Stoffe), Glas und Porzellan gehören zu den schlechten Wärmeleitern. Daß das Glas beim Erwärmen leicht zerspringt, hat seinen Grund in dem schlechten Wärmeleitungsvermögen des Glases. Wenn ein Teil des Glases erwärmt wird, so dehnt sich dieser stark aus, und da die Wärme nicht schnell auf die benachbarten Teile übergeht, entsteht an der erwärmten Stelle eine Spannung, durch die das Glas gebogen und zerbrochen wird.

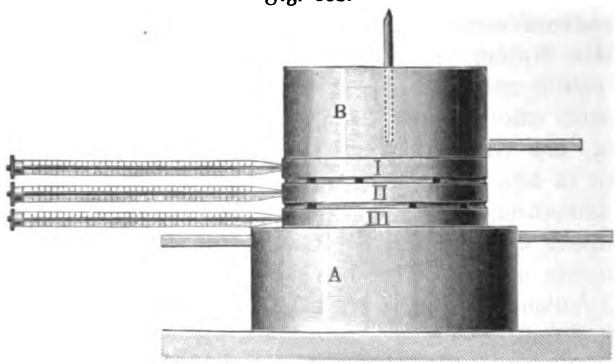
§ 150. Professor C. Christiansen in Kopenhagen hat einen Apparat

Digitized by Google

konstruiert, der dazu dient, das Wärmeleitungsvermögen verschiedener Flüssigkeiten zu vergleichen. Die Vergleichung wird ebenso wie bei dem Biotschen Verfahren durch Beobachtung eines stationären Zustandes ausgeführt.

Der zur Ausführung der Versuche dienende Apparat (Fig. 133) besteht aus drei Kupferplatten I, II, III. Die unterste liegt auf dem Gefäße *A* und auf der obersten steht das Gefäß *B*. Die drei Platten werden durch zwischengelegte Glasklötzchen voneinander getrennt gehalten, und zwar so, daß die mittlere gleichen Abstand von den beiden äußeren hat. Durch das untere

Fig. 133.



Christiansens Messung der Wärmeleitung der Flüssigkeiten.

Gefäß fließt fortwährend kaltes Wasser und das obere wird durch Dampf oder warmes Wasser erwärmt. In dem Zwischenraume zwischen I und II befindet sich z. B. Wasser, welches durch die Adhäsion an die Metallplatten am Ausfließen verhindert wird, und in dem Zwischenraum zwischen II und III die Flüssigkeit, deren Wärmeleitungsvermögen mit dem des Wassers verglichen werden soll. Nun strömt die Wärme von dem oberen Gefäße durch die Kupferplatten und die Flüssigkeitsschichten nach dem unteren Gefäße, und die drei Kupferplatten nehmen nach einiger Zeit bestimmte Temperaturen an. Sobald diese konstant geworden sind, werden sie an den in die Kupferplatten eingelassenen Thermometern abgelesen. In den Flüssigkeiten entsteht keine Strömung, da die wärmsten Teile derselben die obersten sind. Wenn der stationäre Zustand eingetreten ist, so erhält die mittlere Platte von der Wasserschicht ebensoviel Wärme, wie sie an die andere Flüssigkeitsschicht abgibt, wenn sie keine Wärme an die Umgebung verliert, was dadurch vermieden werden kann, daß die mittlere Platte auf der Temperatur der Umgebung gehalten wird.

Jetzt wird also durch jede der beiden Flüssigkeitsschichten dieselbe Wärmemenge hindurchgeleitet, und da sie gleiche Dicke und gleiche Oberfläche haben, müssen sich die Wärmeleitungsvermögen der Flüssigkeiten umgekehrt wie die Temperaturunterschiede zwischen I und II und zwischen II und III verhalten, indem der größere Temperaturunterschied selbstverständlich dem geringeren Leitungsvermögen entspricht.

Digitized by Google

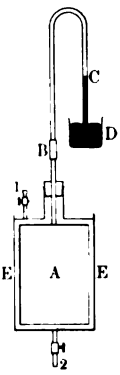
Beispiel. Die obere Flüssigkeitsschicht besteht aus Wasser, die untere aus Glyzerin. Die Temperaturen der drei Platten I, II, III sind beziehungsweise 18°, 15° (Zimmertemperatur) und 10° C. Dann verhält sich das Leitungsvermögen des Wassers zum Leitungsvermögen des Glyzerins wie 15 — 10 : 18 — 15, d. h. wie 5 : 3. Das Leitungsvermögen des Glyzerins ist $^3/_5$ von demjenigen des Wassers.

Alle Flüssigkeiten, mit Ausnahme des Quecksilbers, sind schlechte Wärmeleiter. Das Leitungsvermögen des Wassers ist ungefähr $^1/_{430}$ vom Leitungsvermögen des Kupfers.

§ 151. Noch schlechtere Wärmeleiter als die Flüssigkeiten sind die Gase. Graf Rumford war der Ansicht, daß Flüssigkeiten die Wärme überhaupt nicht leiten, weil es ihm nicht gelang, die Leitungsfähigkeit nachzuweisen. Noch viel schwieriger ist es, die Leitungsfähigkeit der Gase nachzuweisen. Erst im Jahre 1860 gelang es dem französischen Physiker Malus, nachzuweisen, daß der Wasserstoff die Wärme leitet. Eine Messung der Größe des Leitungsvermögens verschiedener Gase wurde 1872 von Joseph Stefan, Professor an der Universität in Wien, vorgenommen.

Die Versuche wurden vermittelst des in Fig. 134 abgebildeten Apparates ausgeführt. Der Metallzylinder *A* steht durch das Rohr *B* mit dem gebogenen Glasrohre *C* in Verbindung, welches mit dem offenen Ende in Quecksilber eintaucht. *A B C D* stellt also ein Luftthermometer vor. Wenn die Luft in *A* erwärmt wird, wird das Quecksilber aus *C* ausgetrieben, und wenn *A* abgekühlt wird, so steigt das Quecksilber in dem Rohre *C* in die Höhe. Der Zylinder *A* wird von einem zweiten Zylinder *E E* umschlossen. Der Zwischenraum zwischen den beiden Zylindern kann vermittelst der Hähne 1 und 2 luftleer gemacht und mit verschiedenen Gasen gefüllt werden. Der ganze Apparat, d. h. die beiden Zylinder nebst Inhalt, wurde nun erwärmt und dann wurde der Zylinder *E* durch Einsetzen in Eiswasser auf 0° abgekühlt. Es ging dann ein Wärmestrom von *A* nach *E*, die Luft in *A* kühlte sich ab und das Quecksilber stieg in dem Rohre *C* in die Höhe. Stefan überzeugte sich, daß die Wärmestrahlung zwischen *A* und *E* keine nennenswerte Überführung von Wärme bewirkte, daß also der Wärmeverlust des Zylinders *A* durch die in der Luftschicht stattfindende Leitung verursacht wurde. Aus der Bewegung des Quecksilbers in *C* konnte der Wärmeverlust und also auch die Größe der Leitung berechnet werden. Es ergab sich, daß die atmosphärische Luft die Wärme ungefähr 30 mal so schlecht leitet wie Wasser oder 13 500 mal so schlecht wie Kupfer.

Fig. 134.



Stefans Messung der Wärmeleitung in Gasen.

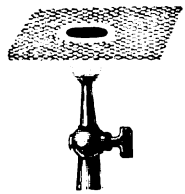
Die meisten Gase besitzen ein ebenso geringes Wärmeleitungsvermögen wie die atmosphärische Luft. Nur der Wasserstoff leitet die Wärme besser, nämlich ungefähr 7 mal so gut wie die Luft.

Digitized by Google

Das Wärmeleitungsvermögen ist bei verschiedenen Temperaturen nicht genau dasselbe. Wenn z. B. von zwei parallelen Seitenflächen eines kupfernen Würfels von 1 cm Kantenlänge die eine auf 0°, die andere auf 1° gehalten wird, so gehen in einer Sekunde 0,7198 Grammkalorien von der einen Fläche zur anderen über. Sind die Temperaturen der beiden Flächen dagegen 100° und 99°, so gehen in einer Sekunde 0,7226 Grammkalorien über. Das Wärmeleitungsvermögen ist also bei der höheren Temperatur größer als bei der niedrigen. Dasselbe gilt für alle anderen Stoffe, die man untersucht hat, sowohl für die festen, als auch für die flüssigen und die gasförmigen.

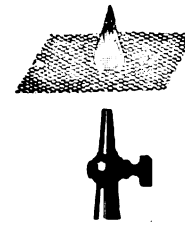
§ 152. Von dem schlechten Wärmeleitungsvermögen gewisser Körper macht man im täglichen Leben vielfache Anwendung. Eiserne Geräte werden mit hölzernen Griffen versehen, damit sie der Hand nicht Wärme entziehen oder, wenn sie warm sind, zu viel Wärme zuführen. Die gute Wärmeleitung der Metalle kommt bei der von Davy (§ 123) konstruierten Sicherheitslampe zur Geltung. Davy hatte beobachtet, daß eine Flamme nicht durch ein Drahtgewebe hindurchschlagen konnte, bevor dieses glühend geworden war (Fig. 135). Hält man das Drahtgewebe in die Flamme, so wird diese durch

Fig. 135.



Abkühlende Wirkung des Drahtgewebes.

Fig. 136.



Abkühlende Wirkung des Drahtgewebes.

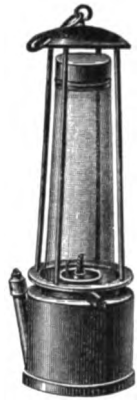
das Gewebe sozusagen abgeschnitten. Der Rauch geht durch das Drahtgewebe hindurch, die Flamme dagegen nicht. Die Wärme der Flamme wird nämlich durch das Metall so schnell fortgeleitet, daß der brennbare Rauch unter die Entzündungstemperatur abgekühlt wird und infolgedessen auf der anderen Seite des Drahtgewebes nicht brennt. Erst wenn die Flamme so lange auf das Gewebe gewirkt hat, daß es glüht, entzünden sich die brennbaren Gase auch oberhalb des Drahtgewebes. Die abkühlende Wirkung des Drahtgewebes läßt sich auch durch folgenden Versuch veranschaulichen. Läßt man Leuchtgas durch ein Drahtgewebe strömen und entzündet es oberhalb des Gewebes (Fig. 136), so schlägt die Flamme nicht nach der unteren Seite des Gewebes durch.

Eine Flamme, die von einem Drahtgewebe umhüllt ist, kann ohne Gefahr in explosive Luft gebracht werden. Die brennbaren Gase dringen zwar in die Hülle am Drahtgewebe ein und verbrennen hier, aber die Verbrennung wird nicht auf die Gase außerhalb der metallischen Umhüllung übertragen.

Digitized by Google

Davy konstruierte die Sicherheitslampe (Fig. 137), um den Bergarbeitern ein Mittel zu geben, sich vor den Gefahren der Grubenexplosionen zu schützen. In den Steinkohlengruben strömen nämlich aus den Kohlenschichten zuweilen plötzlich große Mengen brennbarer Gase (Grubengas) aus, die, mit Luft gemischt, ein explosives Gemenge bilden. Wird das Gemenge durch die Flamme einer Grubenlampe entzündet, so erfolgt eine heftige Explosion, und bei solchen Gelegenheiten sind nicht selten zahlreiche Bergleute umgekommen. Beim Gebrauch der Sicherheitslampe macht sich das Auftreten der brennbaren Gase bemerkbar, indem sie innerhalb des Drahtgewebes verbrennen, und die Arbeiter können sich in Sicherheit bringen, bevor eine Explosion erfolgt. In der Regel erlischt die Sicherheitslampe bei der Explosion innerhalb des Drahtgewebes. Wenn dagegen die Explosionen schwach sind, so brennt die Lampe weiter und das Drahtgewebe wird glühend, wenn die Lampe nicht rechtzeitig von der gefährdeten Stelle entfernt wird. — Stephenson (§ 114) erfand, unabhängig von Davy, eine ähnliche Sicherheitslampe, die den Vorzug hatte, daß sie von der Explosion immer ausgelöscht wurde und die daher absolut gefahrlos war. In neuerer Zeit benutzt man in den Bergwerken elektrische Glühlampen, die große Sicherheit bieten.

Fig. 137.



Davysche Sicherheitslampe.

§ 153. Wenn ein Körper davor geschützt werden soll, daß er seine Wärme durch Leitung verliert, so muß er mit schlechten Wärmeleitern umgeben werden. Den besten Wärmeschutz würde aber, wie sich aus dem Vorhergehenden ergibt, eine ruhende Luftschicht bilden. Dies wird zum Teil dadurch erreicht, daß man den Körper mit Stoffen bedeckt, die zahlreiche, mit Luft gefüllte kleine Zwischenräume haben, z. B. Stroh, Spreu, Sägespäne und Wolle, in denen die Luft, auch wenn sie erwärmt wird, nicht leicht in Strömung kommt. Junge Bäume und Sträucher umwickelt man mit Stroh, um das Eindringen der kalten Luft zu verhindern, und die Menschen bekleiden sich mit wollenen und ähnlichen Stoffen, damit die Wärme des Körpers nicht an die äußere Luft abgegeben wird. Unter den Kleidungsstücken und unter den Decken sind immer diejenigen die „wärmsten", deren Stoff die meisten lufterfüllten kleinen Zwischenräume besitzt.

Durch einfache Fenster findet im Winter ein sehr bedeutender, durch Doppelfenster dagegen nur ein sehr geringfügiger Wärmeverlust statt. Auch hier ist es die zwischen den beiden Fenstern eingeschlossene Luftschicht, die den Wärmeverlust verhindert, weil die Luft nur schwer in strömende Bewegung kommen kann. Aus demselben Grunde sind hohle Mauern „wärmer" als massive.

Vor einer Reihe von Jahren hat N. J. Fjord (1825 bis 1891) Versuche über das „Kochen in Heu" gemacht, bei dem die Wirkung der schlechten Wärmeleiter zur Geltung kommt. Das zu kochende Gericht, namentlich Fleisch,

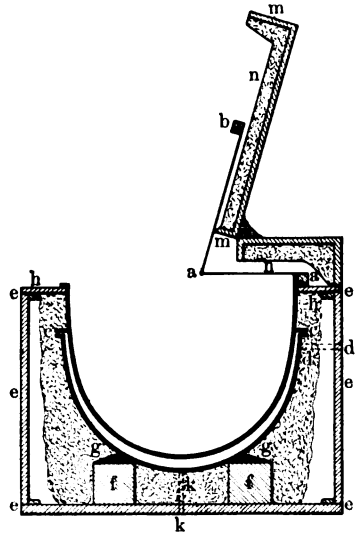
Digitized by Google

wird mit Wasser bis zum Sieden des letzteren erhitzt, und dann wird der Topf in einen mit Heu oder Baumwolle ausgekleideten Kasten gestellt. Die Wärme hält sich mehrere Stunden lang und dringt während dieser Zeit in das Innere des Fleisches ein. Es findet also nur eine durchdringende Erwärmung, nicht ein eigentliches Kochen statt.

Auf hohen Bergen muß in Papinschen Töpfen gekocht werden, da hier das Wasser in offenen Gefäßen bei einer zu niedrigen Temperatur siedet.

Die Einrichtung eines Kessels, den Fjord für das städtische Hospital in Kopenhagen konstruierte, ist aus Fig. 138 ersichtlich. Der Kessel, der 270 Liter faßte, war ein emaillierter Doppelkessel. Der äußere war bei *c* an den inneren angeschraubt. Der Kessel wurde dadurch erwärmt, daß durch das Rohr *d* Dampf in den Zwischenraum zwischen den beiden Kesseln eingeblasen wurde. Das verdichtete Wasser lief durch das Rohr *k* ab. Der Kessel, der mit einem doppelten und dicht schließenden Deckel versehen war, stand in einem Holzkasten *e e* auf vier Holzklötzen *f f*. Der Kessel war von Baumwolle umhüllt und der Deckel war ebenfalls mit Baumwolle gefüllt. Nachdem das Wasser im Kessel zum Sieden erhitzt war, wurde der Dampfstrom unterbrochen und, sobald das Sieden aufhörte, aber das Wasser noch 100° hatte, der Deckel geschlossen.

Fig. 138.



Fjords Dampftopf.

Wie langsam jetzt die Abkühlung erfolgte, ergibt sich aus der folgenden Tabelle. Als der Deckel des Topfes herabgelassen wurde, hatte das Wasser 100° C, nach

½ Stunde	100°	4 Stunden	98,1°
1 „	99,7°	10 „	94,1°
2 Stunden	99,4°	14 „	92,2°
3 „	98,9°	19 „	89,7°

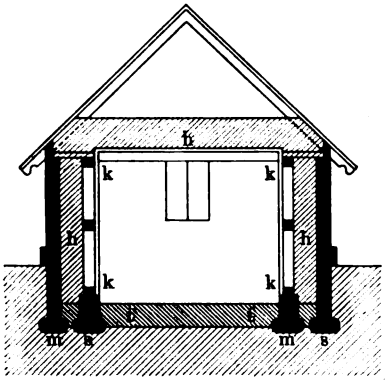
Die Temperatur des Wassers hielt sich also 18 Stunden lang über 90°, und in den drei ersten Stunden änderte sich die Temperatur nicht mehr, als sich der Siedepunkt selbst infolge des wechselnden Barometerstandes ändern kann.

§ 154. Im Anschluß an N. J. Fjords Versuche über das „Kochen in Heu" mögen auch seine Versuche über die Aufbewahrung von Eis erwähnt werden. Er empfiehlt zu diesem Zwecke ein Eishaus von der aus Fig. 139 und 140 ersichtlichen Einrichtung. Die äußere Mauer *m s* und der mit dieser parallele meterhohe Sockel *s m* sind aus gewöhnlichen Mauersteinen aufgeführt. Auf dem Sockel ruht der hölzerne Kasten *k k*, der den eigentlichen Eisraum

Digitized by Google

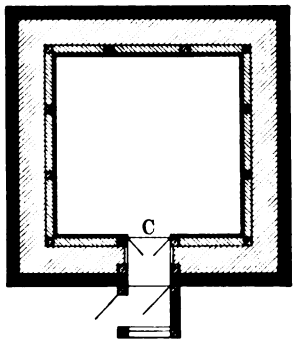
bildet. Den Boden des Eisraumes bildet eine meterdicke Schicht Torf, der das Schmelzwasser leicht aufnimmt und abgibt und infolge seines schlechten Wärmeleitungsvermögens die Erdwärme abhält. An den Seiten und oben

Fig. 139.



Fjords Eishaus.

Fig. 140.



Durchschnitt durch Fig. 139.

ist der Eisraum mit einer Schicht Häcksel umgeben. Das Haus muß vollkommen dicht sein, so daß kein Luftzug entstehen kann, und die Tür muß eine Doppeltür sein und luftdicht schließen.

§ 155. Beobachtungen über die Temperatur in Bergwerken und in Bohrlöchern haben zu dem Resultate geführt, daß die Temperatur der Erde mit der Tiefe zunimmt, und zwar so, daß sie für je 30 m Tiefe um 1° C steigt. Die Folge hiervon muß sein, daß ein beständiger Wärmestrom vom Inneren der Erde nach der Oberfläche geht. Man kann über die Größe des Wärmeverlustes, den dieser Strom zur Folge hat, eine Berechnung anstellen, wenn man das Wärmeleitungsvermögen der Erdrinde kennt. Diese ist höchstens 0,01, d. h. durch einen Würfel von der Leitungsfähigkeit der Erdrinde, dessen Kante 1 cm ist, geht von einer Seitenfläche nach der gegenüberliegenden in einer Sekunde 0,01 Grammkalorie, wenn die eine Seitenfläche um 1° C wärmer ist, als die gegenüberliegende. Durch eine Erdsäule von 1 qcm Querschnitt und 30 m Höhe gehen dann in einer Minute $\frac{0{,}01 \cdot 60}{3000} = 0{,}0002$ Grammkalorien, wenn die Temperatur durch die ganze Säule hindurch um 1° steigt. Im Laufe eines Jahres werden also ungefähr 105 Grammkalorien nach der Erdoberfläche geleitet. Da sich die mittlere Temperatur auf der Erdoberfläche nicht ändert, so geht die aus dem Erdinneren zugeführte Wärme verloren, und es bietet sich die Frage, ob nicht infolgedessen die Erde in absehbarer Zeit eine Abkühlung erleiden muß. Um hierüber eine Berechnung anzustellen, muß man sich erinnern, daß jedem Quadratzentimeter der Erdoberfläche 210 000 000 ccm Inhalt entsprechen. Auf diese muß der Verlust der 105 Grammkalorien verteilt werden. Auf jedes Kubikzentimeter kommt

Digitized by Google

ein jährlicher Verlust von $^1/_{2000000}$ Grammkalorie. 1 ccm der Erdmasse wiegt durchschnittlich 5 g, und wenn man die spezifische Wärme der Erdmasse gleich 0,1 setzt, was etwas zu wenig ist, so gibt 1 ccm bei einer Abkühlung um 1° eine halbe Grammkalorie ab. Dies würde $0{,}5 : {}^1/_{2000000} = 1\,000\,000$ Jahre erfordern. In Wirklichkeit ist bei dieser Berechnung der Wärmeverlust zu hoch gerechnet, so daß man sagen kann, daß die Erde infolge der Wärmeleitung vom Inneren nach der Oberfläche in einigen Millionen Jahren eine Abkühlung um 1° C erleidet.

Die Natur der Wärme.

Carnots Kreisprozeß.

§ 156. Die Wattsche Dampfmaschine hat nicht nur auf die Technik, sondern auch auf die theoretische Wärmelehre einen bedeutenden Einfluß ausgeübt. Die ausgedehnte Anwendung der Dampfmaschine mußte naturgemäß zu einem eingehenderen Studium des Zusammenhanges zwischen Wärme und Arbeit anregen, da ja die Dampfmaschine durch Wärme Arbeit leistet. Man wußte auch, daß die gewaltigen Bewegungen der Luft und des Wassers auf der Erdoberfläche durch die Wärme hervorgerufen werden. Man wußte ferner, daß sich die Luft erwärmt, wenn sie zusammengedrückt wird, was einen Verbrauch von Arbeit bedingt, und daß sie sich abkühlt, wenn sie sich ausdehnen kann, d. h. wenn sie Arbeit leistet. Es waren also mannigfache Verhältnisse, die dazu aufforderten, über das Wesen der Arbeitsleistung durch Wärme näher nachzudenken.

Merkwürdigerweise nahm keiner der großen Forscher, die im ersten Viertel des 19. Jahrhunderts lebten, die Frage in Angriff. Es hat fast den Anschein, als ob die vielseitige Anwendung der Wärmemaschine die Aufmerksamkeit der Gelehrten von dieser wichtigen Frage abgelenkt habe. Wie es sowohl früher als später oft der Fall gewesen ist, führte auch diesmal nicht die wissenschaftliche Erkenntnis, sondern eine unmittelbare geniale Betrachtung allgemeiner Tatsachen zur Lösung der Frage.

§ 157. Ein junger französischer Ingenieuroffizier, Sadi Carnot (1776 bis 1832), veröffentlichte 1824 eine Abhandlung „Über die bewegende Kraft des Feuers". Indem er von allgemein bekannten Erfahrungen ausgeht, sucht er zu erklären, unter welchen Bedingungen mit Hilfe der Wärme mechanische Arbeit gewonnen werden kann.

Carnot weist zunächst darauf hin, daß jede Arbeit, die von der Wärme ausgeführt wird, von einem Übergang von Wärme von einem wärmeren zu

Digitized by Google

einem kälteren Körper begleitet ist, daß man also einen Temperaturunterschied erzeugen muß, durch den dieser Übergang ermöglicht wird. Ein Temperaturunterschied kann aber sowohl durch Wärme als auch durch Kälte hervorgebracht werden. Es würde also nichts im Wege stehen, ebensogut „Kältemaschinen" als „Wärmemaschinen" zu konstruieren. Beide würden auf demselben Prinzip beruhen, nämlich auf der Überführung von Wärme. In einer Dampfmaschine mit Kondensator wird sowohl Wärme (im Kessel) als Kälte (im Kondensator) zur Hervorbringung des Temperaturunterschiedes verwendet. Sobald dieser vorhanden ist, kann unter allen Umständen Arbeit gewonnen werden. Die Ausgleichung des Temperaturunterschiedes hat nämlich eine Ausdehnung und Zusammenziehung der Körper zur Folge, die erwärmt oder abgekühlt werden, einerlei ob diese Körper feste, flüssige oder gasförmige sind. Die Änderung des Volums eines Körpers kann aber immer durch geeignete Mittel in Arbeit umgesetzt werden, ebenso wie man das Volum eines Körpers durch Aufwendung von Arbeit verändern kann. In den „Wärmemaschinen" finden gasförmige Körper Anwendung, weil sie sich beim Erwärmen stärker ausdehnen als feste und flüssige (vergl. § 14). Aber hier entsteht die wichtige Frage, ob die Arbeit, die durch eine bestimmte Wärmemenge gewonnen werden kann, wenn diese um eine Anzahl von Graden „fällt", von dem Körper abhängt, durch den die Wärme von der höheren auf die niedrigere Temperatur gebracht wird, oder ob sie immer eine bestimmte Größe hat.

Fig. 141.

Sadi Carnot.

Um hierüber ins klare zu kommen, stellte sich Carnot vor, aus einem Dampfkessel, der 200° warm ist, werde ein gewisses Volum Dampf in einen Zylinder abgelassen, in dem er sich ohne Wärmezufuhr ausdehnt und dabei eine gewisse Arbeit A leistet, indem er sich zugleich auf 150° abkühlt. Sodann wird dieser Dampf in einen anderen Kessel gedrückt, der eine Temperatur von 150° besitzt. Hierzu ist eine Arbeit B erforderlich, die kleiner als A ist, weil die Zusammendrückung bei 150° stattfindet, während die Ausdehnung bei 200°, also bei höherem Dampfdruck, stattfand. Es wird also durch diesen Prozeß eine Arbeit $A - B$ gewonnen und es wird eine gewisse Wärmemenge V aus dem Kessel von 200° in den Kessel von 150° übergeführt. Kehrte man nun den Prozeß um, d. h. nahm man dasselbe Volum Dampf aus dem Kessel von 150°, drückte den Dampf zusammen, daß seine Temperatur 200° wurde, und drückte ihn dann in den Kessel von 200°, so mußte

Digitized by Google

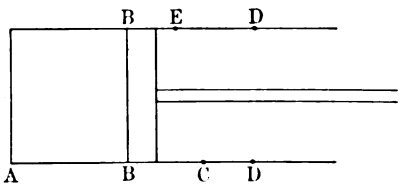
Arbeit verbraucht werden, um dieselbe Wärmemenge V von 150° auf 200° zu bringen, und es leuchtet ein, daß hierzu dieselbe Arbeitsmenge verbraucht werden mußte, die vorher gewonnen wurde, vorausgesetzt, daß keine Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Es ist hierbei zu berücksichtigen, daß nach Carnots Meinung der Dampf von 150° dieselbe Wärmemenge enthielt wie der Dampf von 200°. Die Wärme war nämlich nach seiner Auffassung ein Stoff, der nicht verschwinden kann und nicht vermehrt werden kann.

Wenn es nun einen anderen Stoff gäbe, der bei Überführung derselben Wärmemenge eine größere Arbeit leisten könnte als Wasserdampf beim Herabgehen von 200° auf 150°, so würde man durch Zurückführen der Wärme durch Wasserdampf einen reinen Gewinn von Arbeit bekommen. Man würde also ein Perpetuum mobile haben. Dies hielt Carnot für unmöglich, und daher muß, so schloß er, jeder Stoff beim Überführen von Wärme von einer höheren auf eine niedrigere Temperatur dieselbe Arbeit leisten können.

Carnot drückt seine Auffassung der Wirkung der Wärme dadurch aus, daß er sagt, die Wärme führe in ähnlicher Weise wie ein Wasserfall Arbeit aus, die Größe der Arbeit werde durch den „Fall" der Wärme von der höheren auf die niedrigere Temperatur bestimmt, ebenso wie das Arbeitsvermögen des Wassers durch die Fallhöhe bestimmt wird. Er macht jedoch darauf aufmerksam, daß man nicht ohne weiteres schließen könne, daß ein doppelt so großer Temperaturunterschied eine doppelt so große Arbeit leiste.

§ 158. Carnot führte sodann in Gedanken einen Versuch, den sog. Carnotschen Kreisprozeß, aus, durch den man findet, welche Menge Arbeit eine gegebene Wärmemenge unter gegebenen Bedingungen überhaupt leisten kann. Aus praktischen Rücksichten wird hier nicht Carnots eigene Darstellung gegeben, sondern eine Bearbeitung derselben, die Clapeyron (1799 bis 1864) im Jahre 1834, zwei Jahre nach Carnots Tode, gegeben hat.

Fig. 142.



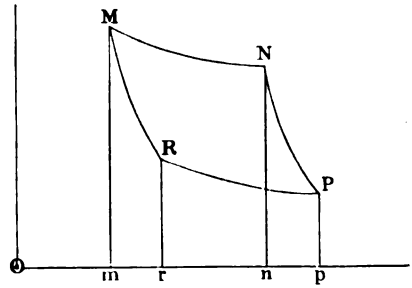
Carnots Kreisprozeß.

In einem Zylinder (Fig. 142) ist hinter dem Kolben eine gewisse Menge Luft von bekannter Temperatur (t_1°) und bekanntem Druck abgesperrt. Der letztere ist erheblich größer als der Luftdruck. Die zusammengedrückte Luft treibt nun den Kolben vorwärts, während auf die Kolbenstange ein Druck ausgeübt wird, der so groß ist, daß er vom Druck der eingeschlossenen Luft gerade überwunden wird. Bei dieser Ausdehnung würde sich die Luft abkühlen (vgl. § 156), aber es wird dafür gesorgt, daß ihr gerade so viel Wärme zugeführt wird, als erforderlich ist, um ihre Temperatur unverändert zu halten. Während der Kolben unter diesen Bedingungen von B bis C geschoben wird, wird der Druck (nach dem Boyleschen Gesetz) immer geringer, und auch den Druck gegen den Kolben muß man sich entsprechend vermindert denken, so daß auf der Innenseite des Kolbens immer ein geringer Überdruck vorhanden ist. Auf dem Wege von B

Digitized by Google

bis C hat dann die Luft eine gewisse Wärmemenge (V_1) aufgenommen und dabei eine gewisse Arbeit (A_1) geleistet. Die Größe der letzteren läßt sich durch eine Fläche darstellen (vgl. § 99). Es sei Om (Fig. 143) das Volum der arbeitenden Luft in der Stellung B (Fig. 142) und Mm der Druck derselben. Wenn der Kolben in C ankommt, ist das Volum größer und zugleich der Druck kleiner geworden. Das erstere wird jetzt durch On, der letztere durch Nn angegeben, und die mit A_1 bezeichnete Arbeit wird offenbar durch die Größe der Fläche $mMNn$ dargestellt. Jetzt wird der Kolben von C nach D weiterbewegt, und zwar nur durch die Ausdehnungskraft der Luft, ohne daß Wärme zugeführt wird. Infolgedessen kühlt sich die Luft (von $t_1{}^0$ bis $t_2{}^0$) ab. Auch während dieser Bewegung hat die Luft eine gewisse Arbeit A_2 geleistet, deren Größe durch die Fläche $nNPp$ angegeben wird. Das Volum ist nämlich um np größer geworden und der Druck hat von Nn bis Pp abgenommen.

Fig. 143.



Carnots Kreisprozeß.

Hiermit ist die erste Hälfte des Kreisprozesses beschrieben, und die Luft hat während derselben die Wärmemenge V_1 aufgenommen und zwei Arbeiten A_1 und A_2 ausgeführt, die zusammen durch die Größe der Fläche $mMNPp$ dargestellt werden. Die zweite Hälfte des Kreisprozesses beginnt nun damit, daß man durch erhöhten Druck auf die Kolbenstange den Kolben bis E zurückschiebt, also die Luft zusammendrückt. Diese würde daher erwärmt werden, allein man denkt sich, sie gäbe genau so viel Wärme (V_2) ab, daß ihre Temperatur unverändert bleibt ($t_2{}^0$). Auf dieser Strecke, von D bis E, wird der abgesperrten Luft die Arbeit A_3 zugeführt, während sie die Wärmemenge V_2 abgibt. In der graphischen Darstellung wird diese Bewegung durch Verminderung des Volums um pr und die Erhöhung des Druckes von Pp auf Rr ausgedrückt, und die zugeführte Arbeit (A_3) wird durch die Größe der Fläche $pPRr$ angegeben.

Endlich wird der Kreisprozeß dadurch vollendet, daß der Kolben von E bis B vorgeschoben wird. Hierdurch wird die Luft erwärmt, und die Stellung E wird so gewählt, daß die Luft beim Zusammendrücken von E bis B genau dieselbe Temperatur und denselben Druck erreicht, mit denen der Kreisprozeß anfing. Das Volum der Luft ist jetzt wieder Om (Fig. 143) und der Druck mM, und es ist der Luft von neuem Arbeit zugeführt worden, die durch die Größe der Fläche $rRMm$ angegeben wird.

Die Luft hinter dem Kolben hat während des Kreisprozesses Wärme aufgenommen und Wärme abgegeben. Zugleich hat sie Arbeit geleistet und es ist Arbeit auf sie verwendet worden.

Digitized by Google

Die vom Kolben ausgeführte Arbeit ist $mMNPp$, die auf ihn verwendete $pPRMm$, also die gewonnene Arbeit $MNPR$.

In welchem Verhältnis steht nun die aufgenommene Wärmemenge (V_1) zu der abgegebenen (V_2)?

Carnot war der Ansicht, diese beiden Wärmemengen seien genau gleich groß. Er betrachtete, wie gesagt, die Wärme als einen Stoff, und da nach seiner Annahme keine Wärme an den Zylinder und den Kolben abgegeben wird und das abgesperrte Luftvolum am Ende des Prozesses denselben Wärmeinhalt hat wie am Anfang, so müssen die beiden Wärmemengen gleich groß sein. Der einzige Unterschied ist der, daß die Wärme in der Temperatur „gefallen" ist, d. h. die zugeführte Wärme ist dem Dampf bei hoher Temperatur zugeführt, aber vom Dampf bei niedriger Temperatur zurückgegeben worden. Wendet man dies auf die Dampfmaschine an, die mit einem Kondensator versehen ist, so bedeutet dies, daß der Dampf dem Kondensator dieselbe Wärmemenge zuführt, die er enthielt, als er aus dem Kessel in den Zylinder übertrat (wenn kein Wärmeverlust durch Leitung und Ausstrahlung stattfindet).

„Diese Tatsache" (daß die abgegebene und die aufgenommene Wärmemenge genau dieselbe ist), sagt Carnot in seiner Schrift aus dem Jahre 1824, „ist niemals in Zweifel gezogen worden . . . Mit der Widerlegung derselben würde die ganze Wärmetheorie in sich selbst zusammenfallen."

Carnot ist jedoch später zu einer anderen Auffassung gekommen. Dies ist jedoch erst bekannt geworden, als sein Bruder Hippolyte Carnot 1878 seine hinterlassenen unvollendeten Arbeiten herausgab (vgl. § 174).

§ 159. Aber selbst wenn er seine ursprünglichen Ansichten beibehalten hätte, würde er nichtsdestoweniger zu den Begründern der modernen Wärmetheorie gehören, weil er es klar und unzweideutig ausgesprochen hat, daß zwischen Wärme und mechanischer Arbeit ein bestimmter Zusammenhang existiert, der von dem Stoff, der die Wärme enthält, und von anderen Umständen unabhängig ist. Es ist nämlich einleuchtend, daß der beschriebene Kreisprozeß umgekehrt werden kann und daß zum Überführen derselben Wärmemenge von der niedrigeren auf die höhere Temperatur ebensoviel Arbeit verbraucht wird, als vorher gewonnen wurde. Ein vorteilhafteres Verfahren, durch Wärme Arbeit zu gewinnen, ist nicht denkbar, denn es würde zu einem Perpetuum mobile führen (vgl. § 156).

§ 160. Die großen Entdeckungen in den Naturwissenschaften kommen keineswegs immer so zustande, daß der eine Forscher direkt die Arbeiten des anderen fortsetzt. Das Ziel wird zuweilen auf wunderlichen Umwegen erreicht. Die Forschung schafft eine Entwickelung, an welcher nicht nur einzelne Auserwählte teilnehmen, sondern die einer ganzen Generation übergeben wird, und aus dieser Entwickelung gehen dann einzelne Forscher hervor, die befähigt sind, den Gesichtspunkt zu erkennen, von dem aus die Einheit in der Mannigfaltigkeit erkannt, d. h. die Entdeckung gemacht wird.

So ging es auch mit der Frage nach der Natur der Wärme. Ungefähr

Digitized by Google

zu gleicher Zeit und unabhängig voneinander fanden verschiedene Forscher dieselbe Lösung, und doch waren es nicht die Versuche Rumfords und Davys, die sie leiteten, nicht der erkannte Zusammenhang zwischen Lichtstrahlen und Wärmestrahlen, auch nicht die Arbeiten Carnots. Jeder von ihnen kam auf seinem eigenen Wege zum Ziel.

Robert Mayer.

§ 161. Im Jahre 1840 ging ein junger Mann, Julius Robert Mayer, als Schiffsarzt auf einem holländischen Dreimaster auf die Reise nach Ostindien. „Das Gute", schreibt er aus dieser Veranlassung an einen Freund, „überwiegt bei mir bei weitem alle diese Fatalitäten: die sehr interessante Seereise, die vielen Länder, Inseln und Völker, die Möglichkeit eines nicht unbedeutenden Gewinnes, aber weit mehr als dieses, daß ich auf diese Art nicht nötig habe, als angehendes Doktorlein in meinem Vaterlande eine geringe Rolle zu spielen, daß ich Gelegenheit habe, die menschliche Natur im gesunden und kranken Zustande sowohl als die Natur überhaupt von einem sehr allseitigen Standpunkt kennen zu lernen."

Einige Tage nach der Ankunft des Schiffes in Batavia brach unter der Mannschaft eine akute Lungenentzündung aus, und Mayer ließ einer größeren Anzahl von Seeleuten zur Ader. Es fiel ihm dabei sehr auf, daß das Blut in der Armvene eine hellrote Farbe hatte, so daß er fast glaubte, er habe eine Arterie getroffen. Er sprach mit dortigen deutschen Ärzten über die Sache, und diese klärten ihn darüber auf, daß in den tropischen Ländern das Venenblut eine auffallend helle Farbe hat. Für Mayer war diese Erscheinung neu, und sie nahm sein Interesse in hohem Grade in Anspruch. Er dachte immer und immer wieder über die Sache nach, und er schreibt über dieselbe:

§ 162. „Von der Theorie Lavoisiers ausgehend, nach welcher die animalische Wärme das Resultat eines Verbrennungsprozesses ist, betrachtete ich die doppelte Farbenveränderung, welche das Blut in den Haargefäßen des kleinen und großen Kreislaufes erleidet, als ein sinnlich wahrnehmbares Zeichen, als den sichtbaren Reflex einer mit dem Blute vor sich gehenden Oxydation. Zur Erhaltung einer gleichförmigen Temperatur des menschlichen Körpers muß die Wärmeentwickelung in demselben mit seinem Wärmeverluste, also auch mit der Temperatur des umgebenden Mediums, notwendig in einer Größenbeziehung stehen, und es muß daher sowohl die Wärmeproduktion und der Oxydationsprozeß, als auch der Farbenunterschied beider Blutarten im ganzen in der heißen Zone geringer sein, als in kälteren Gegenden."

Sein Grundgedanke war also der, daß in den Tropen, wo die Lufttemperatur hoch ist, die Oxydation im Blut weniger lebhaft ist, weil der Körper keine sehr starke Wärmeentwickelung nötig hat, da der Wärmeverlust an die Umgebung geringer ist als in den gemäßigten und kalten Gegenden.

In engem Zusammenhang mit diesem Grundgedanken steht offenbar die

Digitized by Google

Auffassung, daß die gesamte Wärme, welche der Körper abgibt, ebensogroß sein muß wie die, welche im Körper durch die Verbrennung entwickelt wird, da die Körpertemperatur unverändert bleibt.

„Die Wärmeentwickelung geht aber", so schließt Mayer weiter, „auf zweierlei Weise vor sich, indem der Tierkörper teils Wärme direkt in seinem Innern entwickelt und durch Mitteilung an seine unmittelbare Umgebung wieder absetzt, teils aber auch vermöge seiner Bewegungsapparate die Fähigkeit besitzt, Wärme auf mechanischem Wege, durch Reibung und dergleichen, selbst an entfernten Orten, zu erzeugen. Nun ist zu wissen nötig, ob die direkt entwickelte Wärme allein, oder ob die Summe der auf direktem und indirektem Wege entwickelten Wärmemengen auf Rechnung des Verbrennungsprozesses zu bringen ist." Mayer beantwortet diese Frage dahin, „daß die gesamte, teils unmittelbar, teils auf mechanischem Wege vom Organismus entwickelte Wärme dem Verbrennungseffekte quantitativ entspricht oder gleich ist, und daß daher die vom lebenden Körper erzeugte Wärme mit der dazu verbrauchten Arbeit in einem unveränderlichen Größenverhältnisse stehen muß".

Dieser Satz hatte jedoch einstweilen nur theoretischen Wert. Er mußte erst durch Versuche bestätigt werden, bevor er für andere als Mayer selbst Bedeutung bekommen konnte. Es waren teils verwickelte, teils wenig bekannte Verhältnisse, aus denen er seine Schlüsse gezogen hatte, und er sah es selbst ein, daß physikalische Untersuchungen erforderlich waren, um Gewißheit in der Sache zu bekommen. Auf physikalischem Gebiete konnte sich Mayer indessen nicht leicht zurechtfinden, da ihm die nötigen Fachkenntnisse fehlten.

§ 163. Mayer war 1814 in Heilbronn geboren, wo sein Vater Apotheker war. In seinem Elternhause hatte er Gelegenheit, Bücher naturwissenschaftlichen Inhaltes zu lesen und sich mit physikalischen und chemischen Experimenten zu beschäftigen. Er interessierte sich besonders für mechanische Apparate, und auch er wollte, wie so mancher Knabe vor ihm und nach ihm, sein Perpetuum mobile haben. Es machte auf ihn, wie er später mitgeteilt hat, einen tiefen und dauernden Eindruck, als es ihm klar wurde, daß es unmöglich sei, einen derartigen Apparat zu konstruieren. — In der Schule zeichnete er sich nicht aus. Er wurde sozusagen nur in den toten Sprachen unterrichtet, und die klassischen Dichterwerke übten eine große Anziehungskraft auf sein poetisches Gemüt aus. Der Grammatik und den übertriebenen Übungen in der Bildung fehlerfreier und eleganter lateinischer Sätze dagegen konnte er keinen Geschmack abgewinnen. Mit 18 Jahren bezog er die Universität Tübingen, um Medizin zu studieren. Er widmete sich dem Studium mit großem Eifer, nahm aber dabei auch am studentischen Leben regen Anteil. Er gründete eine neue Studentenverbindung, die sich aber bald formell wieder auflöste, um sich den vom Bundestag veranlaßten Studentenverfolgungen zu entziehen. Die Verbindung bestand jedoch im geheimen weiter, und als dies entdeckt wurde, mußte Mayer Tübingen verlassen. Er studierte kurze Zeit in München und Wien, erhielt aber alsbald die Erlaubnis,

Digitized by Google

nach Tübingen zurückzukehren, wo er 1838 als Doktor der Medizin promovierte.

Noch bevor er seine Studien beendete, hatte er sich auf den Rat seines Vaters entschlossen, als Schiffsarzt in holländische Dienste zu treten. Bevor er einberufen wurde, hielt er sich einige Zeit in Paris auf, was für seine späteren Arbeiten von Bedeutung wurde. Hier traf er nämlich mit einigen früheren Studiengenossen zusammen, unter anderen mit Karl Baur, der später Professor der Mathematik und Mechanik in Stuttgart wurde, sowie mit dem berühmten Arzt Wilhelm Griesinger. Mit diesem trat er nach seiner Rückkehr in Briefwechsel über seine Ideen über den Zusammenhang zwischen Wärme und Arbeit.

§ 164. Mayer erkannte, wie gesagt, daß der Beweis für die Richtigkeit seiner Schlüsse nur auf physikalischem Wege zu erbringen war. Er verlegte sich daher auf ein gründliches Studium der Physik und Chemie, und bei dem letzteren Studium war er überrascht, als er bemerkte, wie klar man darüber war, daß ein ganz bestimmter ursächlicher Zusammenhang zwischen den „verschwindenden" und den „entstehenden" Stoffen besteht. In der Physik dagegen ist „der rote Faden" an tausend Stellen unterbrochen, hier hat man Ursache ohne Wirkung und Wirkung ohne Ursache. „Es ist von jeher sanktioniert, anzunehmen: die Bewegung hört bei der Reibung u. s. w. zu sein auf. Daß dabei Wärme zutage kommt, weiß jedes Schulkind; die Wissenschaft begnügt sich inzwischen mit dem Faktum und stellt mit Resignation das Axiom auf, daß die Reibungswärme unerklärbar sei." Zu einem weit natürlicheren Schlusse kommt man, indem man sagt, wenn Bewegung nicht in nichts verwandelt, und Wärme nicht aus nichts entstehen kann, so muß die Wärmemenge, die durch Reibung entwickelt wird, gleichwertig (äquivalent) mit der Bewegung sein, die zur Überwindung der Reibung verbraucht wurde.

Ein solcher Gedankengang ist es, den Mayer in die Physik einführen will. Jede Ursache soll ihre Wirkung und jede Wirkung ihre Ursache haben. Die Chemiker wenden diesen Grundsatz auf dem Gebiete der Stoffe an, Mayer verlangt, daß er auch auf dem Gebiete der „Kraft" (nach heutiger Bezeichnung „Energie") zur Geltung gebracht wird.

§ 165. Energien, meint er, sind Ursachen, und in einer Kette von Ursachen und Wirkungen kann niemals ein Glied oder ein Teil eines Gliedes fehlen. Die Ursachen (d. h. Energien) können daher nicht vernichtet werden, dagegen können sie verschiedene Formen annehmen. Eine Ursache, die eine Last in die Höhe hebt, ist eine Energie, deren Wirkung (die darin besteht, daß die Last höher liegt als vorher) ebenfalls Energie ist. Eine solche Energie nennt man heute Energie der Lage (vgl. I, § 181). — Es war lange vor Mayer bekannt, daß die Energie der Lage dadurch in Energie der Bewegung umgewandelt werden kann, daß man den gehobenen Körper fallen läßt, und daß die gewonnene Energie der Geschwindigkeit gleich der verlorenen Energie der Lage ist (I, § 182), ebenso, daß ein Körper, der vertikal in die Höhe geworfen wird, an Energie der Bewegung ebensoviel verliert, als er an

Digitized by Google

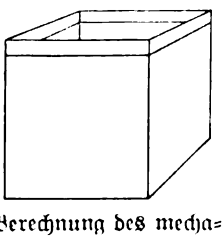
Energie der Lage gewinnt. Mayer weist darauf hin, daß man häufig beobachtet, daß eine Bewegung (also Energie der Bewegung) verschwindet, ohne daß eine andere Bewegung oder Energie der Lage zum Vorschein kommt, und er fragt, wo die Energie der Bewegung geblieben ist, wo ihre Wirkung zu suchen ist. Er richtet seine Aufmerksamkeit besonders auf das Entstehen von Wärme beim Aneinanderreiben zweier Metallplatten. Die Bewegung verschwindet infolge des Reibungswiderstandes, und die einzige Wirkung, welche man beobachtet, besteht darin, daß die Platten warm werden. Er muß daher schließen, daß die Energie der Bewegung (die eine Ursache ist) in Wärme (die also die Wirkung ist) in derselben Weise umgesetzt wird, wie Energie der Bewegung in Energie der Lage umgesetzt werden kann. Wärme ist also eine Form der Energie.

Um den natürlichen Zusammenhang zwischen Energie der Lage, Energie der Bewegung und Wärme zu zeigen, schreibt er: „Wir wissen, daß Wärme zum Vorschein kommt, wenn die einzelnen Massenteile eines Körpers sich näher rücken; Verdichtung erzeugt Wärme; was nun für die kleinsten Massenteile und ihre kleinsten Zwischenräume gilt, muß wohl auch seine Anwendung auf große Massen und meßbare Räume finden. Das Herabsinken einer Last ist eine wirkliche Volumensverminderung des Erdkörpers, muß also gewiß mit der dabei sich zeigenden Wärme im Zusammenhang stehen; diese Wärme wird der Größe der Last und ihrem (ursprünglichen) Abstande genau proportional sein müssen."

Hier hat er also die Kette: Energie der Lage, Energie der Bewegung, Wärme. Jedes Glied ist die Wirkung des vorhergehenden und von demselben Wert wie dieses. Die Kette kann auch in umgekehrter Reihenfolge genommen werden, die Wärme kann vermittelst einer Dampfmaschine Bewegungsenergie erzeugen und diese kann durch Heben einer Last in Energie der Lage umgewandelt werden.

§ 166. Diese Gedanken werden von Mayer in einer 1842[1]) erschienenen Abhandlung entwickelt, in der er auch angibt, wie sich das Verhältnis zwischen Wärme und Bewegungsenergie (Arbeit) durch eine Zahl ausdrücken läßt[2]).

Fig. 144.



Berechnung des mechanischen Wärmeäquivalents.

Man denkt sich einen mit Luft gefüllten Hohlwürfel (Fig. 144), dessen Kante ein Meter, dessen Inhalt also ein Kubikmeter ist. Die oberste Seitenfläche des Würfels ist beweglich, während die fünf übrigen fest und unbeweglich sind. Die oberste kann ähnlich wie der Kolben eines Dampfzylinders in den von den übrigen Würfelflächen gebildeten Kasten mehr oder weniger hineingedrückt werden. Auf der Würfel-

[1]) Sie erschien in den Annalen der Chemie und Pharmacie.

[2]) Eingehender behandelt Mayer die Berechnung dieser Zahl in einer Abhandlung, die unter dem Titel „Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel" 1845 in Heilbronn erschien.

Digitized by Google

fläche lastet der Luftdruck, der gleich dem Gewicht einer Quecksilbersäule von 0,76 m Höhe ist (I, § 234). Da die Würfelfläche 1 qm ist, so ist der Druck der Luft auf sie gleich dem Gewicht von 0,76 cbm Quecksilber. Das spezifische Gewicht des Quecksilbers ist 13,6, d. h. 1 ccm Quecksilber wiegt 13,6 g, 1 cbm also 13600 kg. Der Druck auf die Würfelseite ist demnach $13600 \cdot 0{,}76 = 10336$ kg.

Wenn nun die Luft im Würfel um 1° C erwärmt wird, so wird die bewegliche Würfelseite um $^1/_{273}$ m gehoben, weil sich die Luft um $^1/_{273}$ ihres Volums ausdehnt (vgl. § 35). Um aber die Würfelseite zu heben, muß die Luft eine Arbeit verrichten, deren Größe durch das Produkt aus dem Druck und der Strecke gegeben ist, um welche sich die Würfelfläche fortbewegt hat. Diese Arbeit ist also gleich $10336 \times {}^1/_{273} = 37{,}8$ Meterkilogramm. Wäre dieselbe Luftmenge in einen Würfel mit sechs festen und unbeweglichen Seitenflächen eingeschlossen gewesen, so würde beim Erwärmen der Luft keine Arbeit geleistet, sondern nur der Druck, den die Luft ausübt, gesteigert worden sein. In diesem Falle würde auch weniger Wärme erforderlich gewesen sein, um die Luft um 1° C zu erwärmen, nämlich ungefähr 0,09 Wärmeeinheiten weniger, als wenn sich die Luft hätte ausdehnen können. Da die Luft in beiden Fällen dieselbe Temperaturerhöhung erfahren hat, so ist in dem einen Falle der Wärmeüberschuß zur Leistung der Arbeit verbraucht worden. Es werden also 0,09 Wärmeeinheiten in 37,8 Meterkilogramm umgesetzt. **Eine Kilogramm-Wärmeeinheit ist also äquivalent mit** (ungefähr) **420 Meterkilogramm.**

Mayer fand allerdings eine erheblich kleinere Zahl (367), weil damals keine hinreichend genauen Messungen des Wärmeverbrauchs bei der Erwärmung der Luft vorlagen.

§ 167. Mayer fand bei den Physikern wenig oder gar kein Verständnis, ja er konnte es nicht einmal erreichen, daß seine Abhandlung in Poggendorffs Annalen abgedruckt wurde. Hierzu hat wohl viel der Umstand beigetragen, daß Mayer seine Darstellung ausschließlich auf den Satz von der Untrennbarkeit von Ursache und Wirkung gründete, ohne die Richtigkeit dieser Behauptung durch den Versuch zu bestätigen. Um die Ansichten der Physiker von Fach kennen zu lernen, befragte Mayer persönlich die Professoren der Physik an den Universitäten Heidelberg und Tübingen. Der erstere, Jolly, erklärte ihm, daß ihm die Sache sehr interessant sei, und munterte ihn auf, „fortzumachen"; der andere, Nörremberg, wandte ein, daß, wenn Mayer recht habe, das Wasser sich beim Schütteln erwärmen müsse. Mayer, dem diese Erscheinung bereits bekannt war[1]), machte den Versuch nach seiner Rückkehr von Tübingen wiederholt, und stets gelang er vollkommen.

[1]) Während der Seereise hatte ihn der Steuermann darauf aufmerksam gemacht, daß vom Sturm gepeitschte Wellen wärmer als ruhiges Seewasser seien.

Digitized by Google

Ludwig August Colding.

§ 168. In demselben Jahre, in welchem Mayer nach Ostindien reiste, wurde in Kopenhagen die erste nordische Naturforscherversammlung abgehalten. Auf dieser Versammlung beabsichtigte ein junger Polytechniker, Ludwig August Colding, einen Vortrag über die Unvergänglichkeit der Naturkräfte zu halten. Er verzichtete jedoch darauf, nachdem ihm Oersted den Rat erteilt hatte, erst durch Versuche den Beweis für die Richtigkeit seiner Ideen zu erbringen.

Colding war 1815 auf Arnakkegaard bei Holbäk geboren, wuchs aber auf Nygaard in der Nähe von Kopenhagen auf. Er kam zu einem Schreiner in Kopenhagen in die Lehre und wurde 1736 Geselle. Im folgenden Jahre begann er an der polytechnischen Lehranstalt seine Studien, die er 1841 beendete. Im Jahre 1843 reichte er seine erste Abhandlung der Gesellschaft der Wissenschaften ein. Nach weiteren Studien, bei denen er von der genannten Gesellschaft unterstützt wurde, reichte er eine größere Abhandlung ein, in der er über zahlreiche Versuche berichtete, die er ausgeführt hatte, um das Verhältnis zwischen Arbeit und Wärme zu bestimmen.

§ 169. Colding hatte ebenso wie Mayer die Frage nach dem Zusammenhang der Naturkräfte in ihrer großen Allgemeinheit erfaßt. Er schreibt: „Es kommt mir vor, als ob es die Erfahrung außer allen Zweifel gesetzt habe, daß die Naturkräfte in einem engen und inneren Zusammenhange stehen, indem die Erfahrung lehrt, daß jede Kraft durch ihre Wirkung andere Naturkräfte hervorrufen und diese zur Wirksamkeit frei machen kann." Durch Reibung wird Wärme und Licht erzeugt, und durch Reibung wird der Bernstein elektrisch. Er erinnert an Rumfords Bohrversuche und an verschiedene andere Arbeiten, die bezweckten, den Zusammenhang zwischen Wärme und Bewegung aufzuklären, und sagt: „Der Gedanke, daß eine Wirksamkeit in der Materie verschwinden könne, ohne wieder als wirkende Ursache hervorzutreten, kommt mir vernunftwidrig vor, und ich behaupte, daß alle Kräfte ohne Ausnahme nur eine Formveränderung erleiden, wenn sie scheinbar verschwinden, und daß sie als wirkende Ursachen in derselben Größe, aber in veränderter Form wieder zum Vorschein kommen."

§ 170. In der Abhandlung aus dem Jahre 1843 teilte er eine Anzahl von Versuchen über die Reibungswärme mit, aus denen er schließen zu können glaubte, daß die Wärmemenge der „verlorenen" Arbeit direkt proportional ist. Die Abhandlung aus dem Jahre 1847 bildet eine Fortsetzung der ersten. Die Versuche wurden mit dem in Fig. 145 und 146 abgebildeten Apparat ausgeführt. Er besteht aus einem Schlitten, der mit Kononenkugeln belastet und auf Metallschienen fortgezogen wird. Die Schlittenkufen sind mit Metallstäben *c* belegt. Sowohl diese, als auch die Schienen, auf denen sie gleiten, liegen auf einer Bahn von Pockholz *b* und können sich ungehindert ausdehnen, da sie nur an dem einen Ende befestigt sind. Der Schlitten wird durch ein

Digitized by Google

Seil, welches über eine Rolle läuft und durch ein Gewicht gespannt wird, fortgezogen, und die durch die Reibung erzeugte Wärme bewirkt eine Verlängerung der Schienen sowie der Metallstäbe der Schlittenkufen. Wenn der Schlitten am Ende der Bahn angekommen ist, wird er durch Heben der Balken *f* in die punktierte Stellung (Fig. 146) gebracht, und so in einen Wagen verwandelt, der mit seinen Rädern auf den Balken steht und auf diesen leicht zurückgerollt werden kann.

Fig. 145.

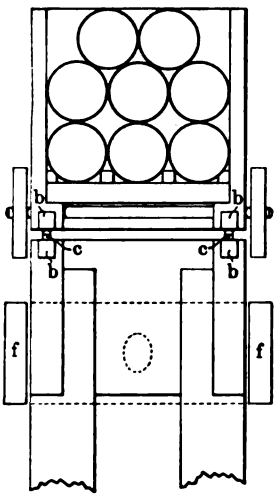
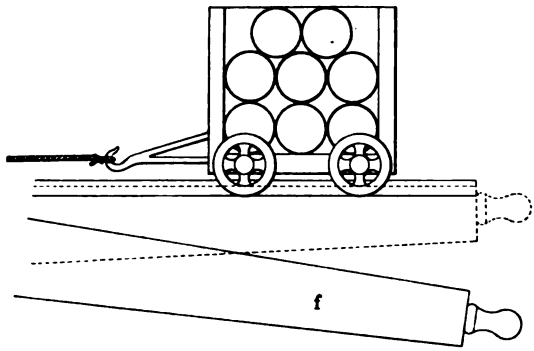


Fig. 146.



Coldings Apparat.

Dann werden die Balken *f* herabgelassen, der Wagen wird wieder zum Schlitten, der von neuem über die Schienen gezogen wird u. s. w. Colding ermittelte die Anzahl von Fußpfund, die zur Überwindung der Reibung erforderlich waren, und aus der Ausdehnung der Metallschienen, die sehr genau gemessen wurde, berechnete er die durch die Reibung erzeugte Wärme.

§ 171. Das Resultat von 14 Versuchsreihen war das folgende:

1. Die entwickelte Wärmemenge nahm mit der Arbeit zu, die zum Fortziehen des Schlittens erforderlich war.

2. Diese Wärmemenge war unabhängig von der Art des Metalles, aus dem die Schienen und die Belegung der Schlittenkufen bestanden.

3. Es wurde im Durchschnitt eine Pfund-Wärmeeinheit durch den Verbrauch von 1185,4 Fußpfund Arbeit entwickelt (eine Kilogramm-Wärmeeinheit durch 372 Meterkilogramm Arbeit).

Colding hatte also durch seine Versuche nachgewiesen, daß zwischen Wärme und mechanischer Arbeit ein unveränderlicher Zusammenhang besteht. Eine bestimmte Menge Arbeit kann durch Reibung in eine ebenso bestimmte Menge Wärme umgesetzt werden. Colding suchte das Verhältnis zwischen der Arbeitseinheit und der Wärmeeinheit oder, wie es jetzt allgemein genannt wird, das mechanische Wärmeäquivalent zu messen, und wenn auch seine Messungen einen zu kleinen Wert ergaben (372 statt 424 Meterkilogramm),

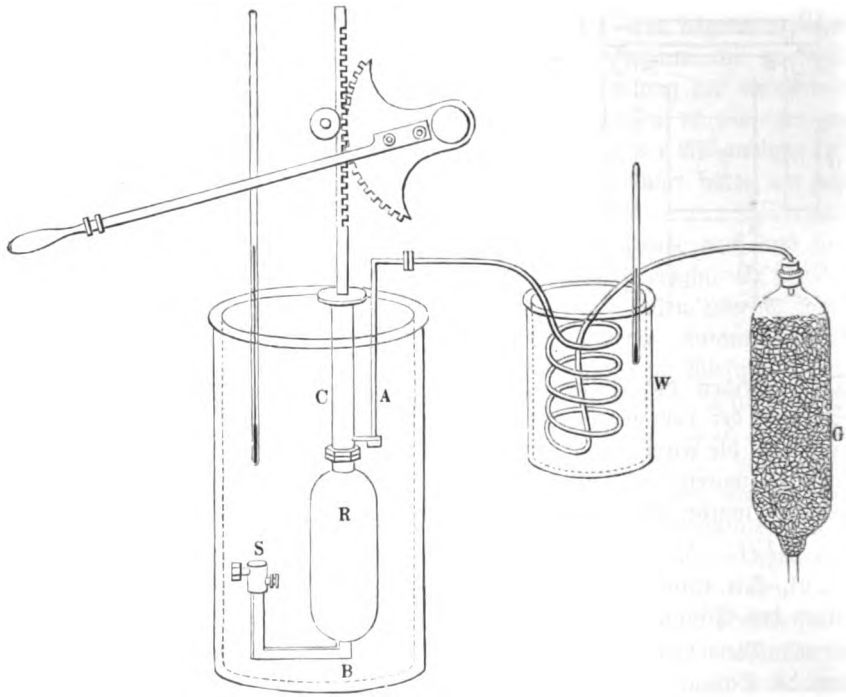
Digitized by Google

so verdient Colding doch mit R. Mayer zusammen als einer der Begründer der mechanischen Wärmetheorie genannt zu werden.

James Prescott Joule.

§ 172. Außer Mayer und Colding hat James Prescott Joule einen wesentlichen Anteil an der Begründung der mechanischen Wärmetheorie genommen, und zwar durch eine äußerst sorgfältige und genaue experimentelle Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalentes. Er gehörte einer Brauerfamilie an und war 1818 in Salford bei Manchester geboren. Bis zu seinem

Fig. 147.



Joules Messung des Wärmeäquivalents.

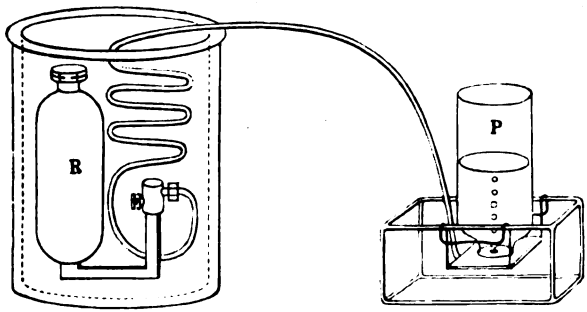
fünfzehnten Jahre wurde er zusammen mit einem älteren Bruder zu Hause unterrichtet. Dann kamen beide zu Dalton (§ 80), der sie in Chemie und Physik unterrichtete. Joule interessierte sich besonders für Physik, und sein Vater richtete ihm ein Laboratorium ein, in dem er sich mit der Ausführung physikalischer Versuche beschäftigen konnte. Trotzdem er nur über geringe Hilfsmittel verfügte, erreichte er doch bald eine solche Fertigkeit im Experimentieren, daß er neue Beobachtungen durch selbständige Versuche machen konnte. Untersuchungen auf dem Gebiete der Elektrizitätslehre veranlaßten ihn, sich auch mit der

Digitized by Google

Frage über das Verhältnis der Wärme zu anderen Naturkräften zu beschäftigen. Wir können an dieser Stelle nicht näher auf diese ersten Arbeiten Joules eingehen, da zum Verständnis derselben die Kenntnis elektrischer Erscheinungen erforderlich ist, von denen erst später die Rede sein wird. Er fand, daß er mit Hilfe von Magnetelektrizität Wärme erzeugen und vernichten konnte, und die Magnetelektrizität erzeugte er durch mechanische Arbeit. Er suchte auf diesem Wege das mechanische Wärmeäquivalent zu ermitteln, aber durch spätere Untersuchungen anderer Art erzielte er genauere Resultate. Wir wollen uns jetzt mit einigen seiner zahlreichen und genial ausgeführten Versuchsreihen bekannt machen.

§ 173. Er bestimmte das Wärmeäquivalent in verschiedener Weise durch Zusammendrücken oder Ausdehnen der Luft. Eine seiner Methoden wird durch Fig. 147 veranschaulicht. In einem gegen Wärmeverlust geschützten Wasserkalorimeter steht ein starker Behälter R, in welchem vermittelst der Luftpumpe C Luft zusammengedrückt wird. Bevor die Luft in den Behälter R eingepreßt wird, durchströmt sie zuerst das Rohr G und dann das in das Wasserbad W eingetauchte Schlangenrohr. Das Rohr G ist mit Bimssteinstücken angefüllt, die mit Schwefelsäure befeuchtet sind. Durch die Schwefelsäure wird der Luft der Wasserdampf entzogen, und in dem Schlangenrohr

Fig. 148.



Joules Messung des Warmeäquivalents.

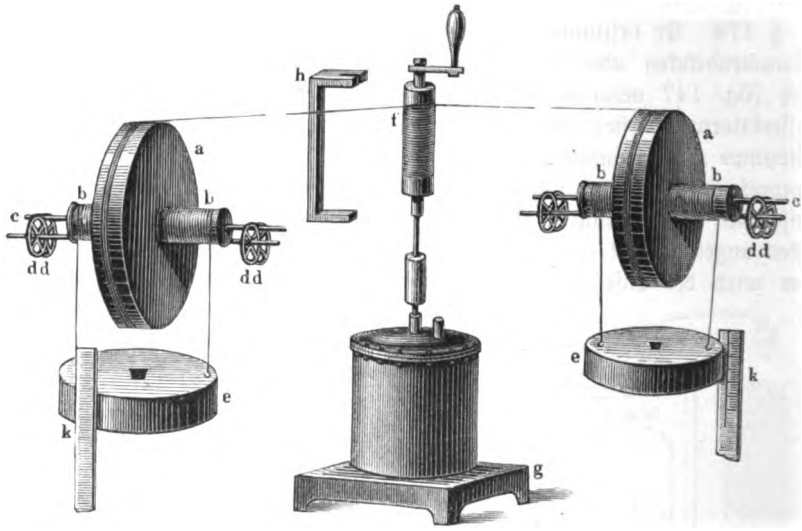
nimmt die Luft eine bestimmte Temperatur an. Wenn nun die Luft in dem Gefäß R zusammengedrückt wird, so erwärmt sie sich und die entwickelte Wärme tritt in das Wasser des Kalorimeters ein. Die Wassermenge ist so bemessen, daß die Temperatur des Wassers vor und nach dem Versuch ungefähr dieselbe und gleich der Temperatur des Wasserbades W ist. Bei dieser Anordnung ist leicht zu berechnen, welche Arbeit zum Zusammendrücken der Luft verwendet worden ist. Man kann nämlich annehmen, das Zusammendrücken sei bei unveränderter Temperatur, also dem Boyleschen Gesetze gemäß, erfolgt (man vergleiche den ersten Teil der zweiten Hälfte des Carnotschen Kreisprozesses, § 158).

Joule führte einen entsprechenden Versuch aus, um das Wärmeäquivalent durch die Abkühlung zu messen, welche die Luft erleidet, wenn sie sich aus-

Digitized by Google

dehnt. Der mit der zusammengedrückten Luft gefüllte Behälter R stand im Wasserkalorimeter (Fig. 148 a. v. S.), und die Luft strömte, wenn der Hahn h geöffnet wurde, durch das Schlangenrohr in ein mit Wasser angefülltes Gefäß. Aus dem Volum der ausgeströmten Luft, die den Luftdruck überwunden und das Wasser aus dem Gefäß ausgetrieben hatte, konnte Joule die Größe der Arbeit berechnen, die die zusammengedrückte Luft geleistet hatte, und vermittelst eines feinen Thermometers, welches in das Kalorimeterwasser eingetaucht war, wurde die dieser Arbeit entsprechende Abkühlung ermittelt.

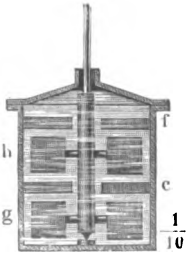
Fig. 149.



Joules Messung des Wärmeäquivalents.

§ 174. Der „reinste" Versuch, den Joule ausführte, war jedoch der folgende, bei dem die Wärme durch Reibung erzeugt wurde. Das auf dem Schemel g (Fig. 149) stehende Gefäß (Quecksilberkalorimeter) hat die aus Fig. 150 ersichtliche Einrichtung. Das um die vertikale Achse drehbare Schaufelrad hat acht Schaufeln bei b und ebensoviel bei g. Die eine Gruppe dieser Schaufeln bewegt sich zwischen den horizontalen Metallplatten f und c, die andere zwischen der Metallplatte c und dem Boden des Gefäßes. Wie die Achse durch das Fallen der Gewichte ee in Drehung versetzt wird, ist leicht aus der Figur zu ersehen.

Fig. 150.



Joules Kalorimeter.

Wenn mit diesem Apparat ein Versuch ausgeführt werden soll, wird zunächst die Verbindung der Walze f mit der Achse vermittelst der Vorrichtung h gelöst. Dann hebt man die Gewichte durch Drehen der

Digitized by Google

Kurbel, stellt die Verbindung zwischen Walze und Achse wieder her und läßt die Gewichte fallen. Nachdem man die Operation 20 mal wiederholt hat, ermittelt man die Temperaturerhöhung, welche das Quecksilber durch die Reibung erfahren hat. Die zur Erzeugung der Wärme verwendete Arbeit ergibt sich aus der Größe der Gewichte und der Fallhöhe. Aus zahlreichen, von Joule ausgeführten Versuchen ergab sich für das mechanische Wärmeäquivalent der Wert 424 Meterkilogramm.

§ 175. Mayer, Colding und Joule erkannten, wie wir gesehen haben, ziemlich gleichzeitig, daß zwischen den verschiedenen Naturkräften ein engerer Zusammenhang existiert, als man bis dahin gewußt hatte. Mayer und Colding haben es klar ausgesprochen, daß sie durch Betrachtungen allgemeinerer Art auf die spezielle Frage nach dem Zusammenhang zwischen Wärme und Arbeit geführt worden sind. Man hat ihnen zum Vorwurf gemacht, daß sie diese Frage nicht hinreichend scharf aufgefaßt, sondern sich in philosophische Spekulationen eingelassen haben. Ganz anders ging Joule zu Werke. Er nahm die Frage auf rein experimentellem Wege in Angriff und zog allein aus den Versuchen seine Schlüsse. Auch er ist von weittragenden Ideen beseelt, sie kommen jedoch selten zum Wort. Allein man merkt sie in manchen Äußerungen, z. B. der folgenden: „Wir können a priori schließen, daß eine absolute Vernichtung von „lebendiger Kraft" unmöglich ist, denn es ist absurd, zu denken, daß die Kraft, welche Gott in den Stoff gelegt hat, leichter vernichtet, als durch die Kraft des Menschen geschaffen werden könne."

Mayer war zu wenig Physiker, um selbständig Versuche zu ersinnen und auszuführen. Aber er benutzte die vorliegenden Versuchsresultate, um die Richtigkeit seiner Ansicht über den Zusammenhang zwischen Arbeit und Wärme zu beweisen. Und was Colding betrifft, so muß eingeräumt werden, daß er eine experimentelle Untersuchung der Frage durchgeführt hat.

Selbstverständlich muß für die Naturwissenschaft unter allen Umständen der Versuch die höchste Autorität sein. Das „Provando e Riprovando" der Accademia del Cimento muß für alle Zeiten der Wahlspruch der Naturwissenschaft sein, allein die Inspiration hat auch hier gerade so gut ihre Berechtigung wie in jeder anderen Geistestätigkeit. — Der Entdecker ist nicht notwendigerweise ein stockgelehrter und regelrechter Fachmann. Man soll nicht, wie sich ein geistreicher Schriftsteller ausgedrückt hat, vom Entdecker verlangen, daß er ein Fachphilister ist, und vom einseitigen Fachphilister soll man keine Entdeckungen erwarten, selbst wenn er noch so gelehrt ist.

§ 176. Es ist ein langwieriger und erbitterter Streit darüber geführt worden, welcher von den drei Männern den Zusammenhang zwischen Wärme und Arbeit zuerst und am besten erklärt hat. Ein solcher Streit ist jedoch nutzlos. Jeder der drei Gelehrten hat ohne Zweifel selbständig gearbeitet, aber sie waren alle drei Kinder derselben Zeit und von der Entwickelung der Wissenschaft, die vorausgegangen war, inspiriert. Daß der Zusammenhang zwischen Wärme und Arbeit an verschiedenen Orten gleichzeitig erkannt wurde,

Digitized by Google

ist für die Wissenschaft ein Glück gewesen, da auf diese Weise das Neue schnell Gemeingut der ganzen zivilisierten Welt wurde.

Wenn der Preis einem einzigen Manne zuerkannt werden soll, so muß dieser Mann Carnot sein, denn aus seinen hinterlassenen Schriften, die im Jahre 1878 veröffentlicht wurden (vgl. § 158), geht hervor, daß er nicht nur wie Rumford und Davy zu der Erkenntnis gekommen war, daß die Wärme kein Stoff ist, sondern daß er auch das mechanische Wärmeäquivalent annähernd richtig bestimmt und Anweisung zu Versuchen gegeben hatte, wie sie später von Joule ausgeführt worden sind. Hätte Carnot einige Jahre länger gelebt, so würde sich die Ermittelung des mechanischen Wärmeäquivalentes wahrscheinlich ganz allein an seinen Namen knüpfen.

Fig. 151.

Robert Mayer.

§ 177. Mayer war seit 1841 in seiner Vaterstadt Heilbronn als Arzt tätig. In den vierziger Jahren veröffentlichte er mehrere wichtige Abhandlungen, die sämtlich den Zusammenhang der Naturkräfte betrafen, die aber fast gar keine Beachtung fanden.

Im Jahre 1847 wurde der Pariser Akademie eine Abhandlung Joules über das mechanische Wärmeäquivalent übergeben, und Mayer richtete an die Akademie ein Schreiben, in welchem er für die Entdeckung des Wärmeäquivalents seine Priorität geltend machte. Joule wies in seiner Entgegnung auf seine Schriften hin und erklärte, daß er ganz unabhängig von Mayer gearbeitet und das Wärmeäquivalent durch eigene Versuche bestimmt habe.

Diese Prioritätsstreitigkeiten, welche jahrelang fortgesetzt wurden, verbitterten Mayer das Dasein. Er wurde tatsächlich verkannt, auch hatte er viel durch den Umstand zu leiden, daß er weit davon entfernt war, ein geschulter Physiker zu sein. Er gab sich mit Leidenschaftlichkeit religiösen Grübeleien

Digitized by Google

hin; er mußte einen Ersatz für die Anerkennung haben, die ihm seine Zeitgenossen versagten. Schließlich wurde er von einer Gehirnkrankheit befallen und er begab sich in eine Heilanstalt in Göppingen. Nach seiner Ansicht wurde er aber hier falsch behandelt. Er ging deshalb in eine andere Anstalt (im Winnental) über. Aber auch hier wurde nach seiner Meinung sein Zustand nicht richtig beurteilt. Er wurde, wie er selbst später in einem Brief geäußert hat, „mit allen erdenklichen somatischen und psychischen Mißhandlungen bedacht, bis es ihm gelang, seine Befreiung zu erzwingen". Dieser Aufenthalt in Irrenheilanstalten dauerte anderthalb Jahre und warf einen Schatten auf sein ganzes späteres Leben. Er hat es selbst nie zugegeben, daß er geisteskrank gewesen sei, sondern ist bis an sein Lebensende der Ansicht gewesen, daß er von unverständigen Ärzten ganz verkehrt behandelt worden sei.

In den fünfziger Jahren fanden die Verdienste Mayers nach und nach die gebührende Anerkennung. Dr. Bohn in München ließ 1857 eine Abhandlung über die Unvergänglichkeit der Kräfte erscheinen, in welcher er anerkennt, daß Mayer den Anstoß zu einer ganz neuen Entwickelung der Physik gegeben habe. Bohn weist darauf hin, daß Mayers Schriften nicht leicht zu verstehen seien, und er fügt hinzu: „Mayer wurde das unglückliche Los zuteil, bald nach dem Erscheinen dieser Schriften im Irrenhaus zu sterben; dies erklärt manches Auffallende und Unklare seiner Arbeiten." — Diese Mitteilung ging in die Tagespresse über, und die Meinung, daß Mayer gestorben sei, hat sich an manchen Orten noch bis in die siebziger Jahre erhalten, trotzdem er 1858 die Naturforscherversammlung in Karlsruhe besuchte und von der Universität Tübingen zum Ehrendoktor ernannt wurde. Der Grund, daß sich das Gerücht so lange erhielt, ist hauptsächlich darin zu suchen, daß die falsche Nachricht auch in Poggendorffs biographischem Wörterbuch (1863) Aufnahme gefunden hatte. Man kann hieraus ersehen, wie wenig beachtet Mayer in Heilbronn lebte. Erst auf der Naturforscherversammlung in Innsbruck (1869) wurde ihm die verdiente Auszeichnung zu teil. Jetzt strömten ihm Ernennungen zum Mitglied gelehrter Gesellschaften, Orden und Medaillen in Menge zu. Er verlebte nun eine Reihe glücklicher Jahre und starb 1878 nach längerem Krankenlager. In seiner Vaterstadt wurde ihm 1892 ein Denkmal errichtet.

§ 178. Colding hatte nicht mit Widerwärtigkeiten zu kämpfen wie Mayer. Er hatte nicht nötig, in solchem Grade wie dieser auf unbedingte Anerkennung zu dringen, sondern er konnte in Ruhe darauf hinweisen, daß er ein selbständiger Entdecker war, und die Geschichte der Physik hat ihn auch als solchen anerkannt. Außer wissenschaftlichen Arbeiten hat Colding auch eine Anzahl technischer Abhandlungen veröffentlicht. Im Jahre 1845 wurde er Beginspektor und 1847 Wasserinspektor. In beiden Stellungen leitete er die Gas- und Wasserwerke von Kopenhagen und arbeitete einen Plan für die Kanalisation der Stadt aus. Seit 1858 war er Stadtingenieur und 20 Jahre lang zugleich Lehrer an der polytechnischen Lehranstalt. Im Jahre 1856

Digitized by Google

wurde er Mitglied der Gesellschaft der Wissenschaften und 1871 erteilte ihm die Universität in Edinburg den Doktorgrad. Er starb 1888.

§ 179. Joule betrieb mit seinem Bruder zusammen die vom Vater ererbte Brauerei bis 1854. In diesem Jahre ging sie durch Kauf in anderen Besitz über. Joules wissenschaftlicher Ruhm datiert aus dem Jahre 1847, in welchem Jahre er die in § 177 erwähnte Abhandlung über das mechanische Wärmeäquivalent der Pariser Akademie sowie der Versammlung englischer Naturforscher (British Association) in Oxford mitteilte. Die ersten Physiker Englands, z. B. Michael Faraday und William Thomson, waren auf dieser Versammlung anwesend. Der letztere schreibt: „Ich machte auf dieser Versammlung die Bekanntschaft Joules, die sich bald in Freundschaft für das ganze Leben verwandelte. Als ich seine Abhandlung verlesen hörte, war ich anfangs in Versuchung, mich zu erheben und zu erklären, daß sie unrichtig sein müsse. Allein nach und nach sah ich ein, daß die Abhandlung eine große Wahrheit und eine große Entdeckung enthielt." — Wie Joule William Thomson gewann, so gewann er durch seine überzeugenden Versuchsreihen schließlich alle, allerdings ging Zeit darüber hin. Man nahm Anstoß daran, daß es sich bei den Versuchen Joules immer nur um sehr geringe Temperaturerhöhungen handelte. Aber schließlich wurde der Wert für das mechanische Wärmeäquivalent, den Joule aus seinen Versuchen abgeleitet hatte, allgemein als richtig anerkannt.

Fig. 152.

L. A. Colding.

Joule war auf verschiedenen Gebieten der Physik, namentlich aber in der Wärmelehre und der Elektrizitätslehre, tätig. In der Bearbeitung seiner Versuchsresultate machte er ebenso wie Faraday von mathematischen Entwickelungen keinen Gebrauch.

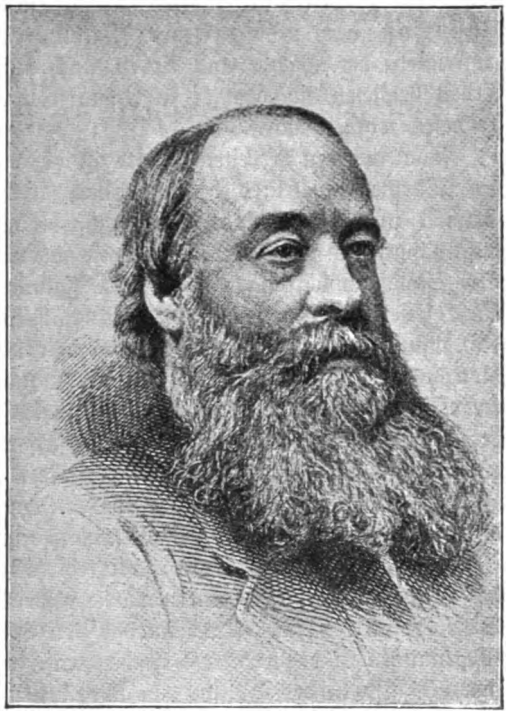
Joule hat nie ein Lehramt bekleidet. Er hatte eine schwache Gesundheit, und es entsprach seinen Neigungen am meisten, in Ruhe und Zurück-

Digitized by Google

gezogenheit zu leben. Er starb 1889 in Sale bei Manchester, und es wurde ihm nachgerühmt, daß in dem mittleren Viertel des 18. Jahrhunderts kein zweiter Gelehrter gelebt hat, dessen Forschungen sich an Bedeutung mit den seinigen messen können.

§ 180. Der Mehrzahl der Physiker in der Mitte des vorigen Jahrhunderts wurde es schwer, sich an die Anschauung zu gewöhnen, daß Wärme und mechanische Arbeit „äquivalent" sind. Dieser Auffassung stand Carnots Satz entgegen, daß die Wärme nur dann Arbeit verrichtet, wenn sie in der Temperatur „fällt", ohne an Menge kleiner zu werden (vgl. § 158).

Fig. 153.



J. P. Joule.

Hier sprach Rudolf Clausius (geb. 1822 in Köslin, gest. 1888 als Professor der Physik in Bonn), der damals Lehrer an der Artillerieschule in Berlin war, das erlösende Wort. Er zeigte nämlich, daß Carnots Kreisprozeß und Carnots Behauptung, daß die Arbeit von der Wärme abhängt, die von einer höheren auf eine niedrigere Temperatur übergeführt wird, sich mit der Lehre von der Äquivalenz von Wärme und Arbeit leicht vereinigen lassen. Die ganze Entwickelung Carnots verlangt nämlich gar nicht, daß die während des Kreisprozesses aufgenommene und abgegebene Wärmemenge dieselbe ist. Carnot selbst sagt allerdings in seiner Schrift, nach seiner Auffassung seien die beiden Wärmemengen genau gleich groß, aber seine Erklärung des Kreisprozesses setzt diese Annahme nicht voraus. Clausius erklärt nun, daß die beim Kreisprozeß gewonnene Arbeit als Äquivalent für eine Wärmemenge auftritt, die verschwindet. Die Folge davon ist, daß die während des Kreisprozesses aufgenommene Wärme größer ist als die abgegebene.

Daß dies wirklich der Fall ist, hat G. A. Hirn, Ingenieur in Kolmar (1815 bis 1890), durch Beobachtungen an der Dampfmaschine nachgewiesen. Seine Versuche waren so angeordnet, daß er die Wärmemenge bestimmen

Digitized by Google

konnte, die dem Dampf durch die Erwärmung der Maschinenteile entzogen wird. Er fand, daß die Wärmemenge, die der Dampf aufnimmt, bevor er in den Zylinder eintritt, größer ist als die Wärmemenge, die der Dampf teils an die Maschinenteile, teils an das kalte Wasser des Kondensators abgibt. Selbstverständlich ist die Ausführung derartiger Versuche mit großen Schwierigkeiten verbunden, und es ist unmöglich, absolut genaue Resultate zu bekommen. Aber Clausius zeigte doch durch eine Berechnung der Hirnschen Versuche, daß die in der Dampfmaschine verbrauchte Wärme ungefähr der von dem Kolben ausgeführten Arbeit entspricht. Hiermit war der erste Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie, d. h. der Satz von der Äquivalenz der Wärme und Arbeit, auch auf dem Wege von der Wärme zur Arbeit bewiesen, nachdem er früher auf dem Wege von der Arbeit zur Wärme bewiesen worden war.

Von anderen Arbeiten Hirns ist die von ihm ausgeführte Bestimmung des Wärmeäquivalentes hervorzuheben. Ein eiserner Zylinder von 350 kg Gewicht und ein prismatischer Sandsteinblock waren an je vier Stricken so aufgehängt, daß sie sich mit zwei gegenüberstehenden Grundflächen berührten. Der Sandsteinblock war an der dem Zylinder zugewendeten Grundfläche mit einer Eisenplatte bekleidet. Die Ausführung des Versuches bestand darin, daß man den eisernen Zylinder aus einer bestimmten Höhe gegen den Steinblock fallen und einen Bleiklotz zusammendrücken ließ und die durch den Stoß erzeugte Wärme ermittelte. Aus einer größeren Anzahl von Versuchen, auf deren Einzelheiten hier nicht näher eingegangen werden kann, ergab sich für das mechanische Wärmeäquivalent der Wert 425,2 Meterkilogramm.

§ 181. Eine kleine Wärmemenge entspricht einer großen Arbeitsmenge, d. h. die Wärme ist eine sehr wirksame Form der Energie. Eine Kilogramm-Wärmeeinheit entspricht einer Arbeit von 424 Meterkilogramm.

Ein Kilogramm Kohlen entwickelt beim Verbrennen 8000 Wärmeeinheiten. Diese entsprechen einer Arbeitsmenge von $8000 \times 424 = 3392000$ Meterkilogramm. Eine Pferdekraft ist die Kraft, welche in der Sekunde eine Arbeit von 75, also in der Stunde eine Arbeit von 270000 Meterkilogramm leistet. Also enthält ein Kilogramm Kohlen eine Energie von 12,5 „Pferdestunden".

Wenn man also Apparate (Maschinen) hätte, vermittelst deren die gesamte Verbrennungswärme in mechanische Arbeit umgesetzt werden könnte, so würde man mit geringen Kohlenmengen sehr große Arbeitsmengen entwickeln können.

Aber hier macht sich der (von Clausius näher entwickelte) Carnotsche Satz (der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie) geltend, daß bei der Umwandlung von Wärme in Arbeit die Wärme einen „Fall" haben, daß sie von einer höheren Temperatur auf eine niedrigere Temperatur übergehen muß. Die Wärmemenge, welche in einer Wärmemaschine in Arbeit umgesetzt werden kann, hängt von der Größe des Temperaturabfalles ab, den man der Wärme verschaffen kann, und diese hängt von rein praktischen Umständen ab.

Digitized by Google

Man hat ermittelt, daß bei gewöhnlichen Dampfmaschinen, bei denen man mit Rücksicht auf die Dichtung des Kolbens nicht weit über 200° C hinausgehen kann, höchstens 20 Proz. der Wärme in Arbeit umgesetzt werden. Bei kleinen Maschinen ist das Verhältnis noch ungünstiger.

Bei den Dampfturbinen (§ 56) liegen die Verhältnisse etwas anders. Da sie nämlich keinen Kolben besitzen, kann man bei ihnen weit höhere Temperaturen benutzen, wodurch eine größere Nutzwirkung ermöglicht wird.

Die mechanische Wärmetheorie.

§ 182. Die Wärme wird also jetzt als Energie aufgefaßt. Die Vorstellung von der Existenz eines Wärmestoffes ist vollständig beseitigt, und die Annahme Rumfords, daß die Wärme eine Art Bewegung ist, hat allgemeine Anerkennung gefunden. Die Wärmestofftheorie ist von der mechanischen Wärmetheorie abgelöst worden, deren Grundlage die im vorhergehenden beschriebenen Entdeckungen und Erfahrungen bilden. Die Theorie geht von der Annahme aus, daß die Wärme in einer Bewegung der kleinsten Teilchen der Körper, einer Bewegung der Moleküle besteht. Diese sind jedoch so klein, daß sie nicht gesehen werden können. Aber ihre Bewegung kann durch die Gefühlsnerven empfunden werden und den Eindruck hervorrufen, den wir Wärme nennen.

Nach der älteren Ansicht über die Natur der Wärme (Heron) ist die Erwärmung eines Körpers die Folge des Eindringens des Feuers (der Wärme) in die Poren des Körpers (§ 38). Der Vorgang des Schmelzens besteht nach Galilei darin, daß die Wärme die Poren vollständig ausfüllt. Auch nach der mechanischen Wärmetheorie können wir uns von den Vorgängen des Erwärmens, des Schmelzens und des Verdampfens eine bestimmte Vorstellung machen. Wir müssen uns zunächst eine bestimmte Vorstellung von der inneren Beschaffenheit der Körper machen. Hierüber wird später ausführlich berichtet werden. An dieser Stelle mögen die folgenden Bemerkungen genügen.

Ein fester Körper besteht aus Molekülen (kleinen Massenteilchen), die einzeln oder gruppenweise mit einer gewissen Anziehungskraft (Kohäsionskraft) aufeinander einwirken. Die Moleküle werden als absolut fest, also als unzusammendrückbar angesehen. Hieraus folgt, daß sich in einem sogenannten festen Körper die Moleküle nicht unmittelbar berühren können, da alle Körper mehr oder weniger zusammendrückbar sind. Aber die Moleküle eines festen Körpers haben eine gewisse Gleichgewichtslage, und wenn sie durch Zusammendrücken oder Ausdehnen des Körpers aus dieser

Digitized by Google

Lage entfernt werden, so streben sie, in dieselbe zurückzukehren. Der Körper nimmt wieder seine ursprüngliche Gestalt und sein ursprüngliches Volum ein, vorausgesetzt, daß die Veränderungen nicht so groß gewesen sind, daß die Moleküle ganz neue Gleichgewichtslagen angenommen haben.

§ 183. Man nimmt ferner an, daß die Moleküle eines festen Körpers nicht in Ruhe sind, sondern um die Gleichgewichtslage hin und her schwingen. Welches die Geschwindigkeit und die Größe dieser Schwingungen ist, hängt von der Temperatur des Körpers ab, oder besser gesagt, die Temperatur wird durch die Größe und die Geschwindigkeit der Schwingungen bestimmt, da, wie gesagt, die Wärme, welche ein Körper enthält, mit der Bewegung der Moleküle gleichbedeutend ist. — Wenn nun ein fester Körper erwärmt wird, so werden die Schwingungen der Moleküle lebhafter, sie werden größer und folgen schneller aufeinander. Wenn wir den Körper berühren, so empfinden wir dieses stärkere Schwingen seiner Moleküle als eine erhöhte Temperatur. Der Nerv, welcher die Wärme empfindet, bekommt von den Molekülen des Körpers bei höherer Temperatur mehr und heftigere Stöße als bei niedrigerer Temperatur. Eine andere Folge der gesteigerten Bewegung besteht darin, daß sich die Moleküle beim Schwingen weiter von der Gleichgewichtslage entfernen als vorher. Der Körper nimmt daher bei höherer Temperatur einen größeren Raum ein oder er dehnt sich beim Erwärmen aus.

§ 184. Wenn sich ein Körper ausdehnt, so hat die Wärme in der Regel in zweifacher Weise Arbeit zu leisten. Ruht nämlich auf der Oberfläche des Körpers ein Druck, z. B. der Atmosphärendruck, so muß der Körper Arbeit leisten, wenn er sich ausdehnt. Die Oberfläche des Körpers muß nämlich einem stetig wirkenden Druck entgegenbewegt werden (vgl. § 166). Außer dieser sog. äußeren Arbeit muß aber auch eine innere Arbeit geleistet werden, um die Ausdehnung zu bewirken. Die Moleküle kommen in neue Gleichgewichtslagen, aber sie werden durch die Kohäsionskraft zusammengehalten. Diese muß also überwunden werden, wenn die Moleküle in die neuen Lagen übergeführt werden. Die hierzu erforderliche Arbeit, welche die Wärme leisten muß, ist die innere Arbeit. Bei den festen Körpern wird jedoch zur Ausführung dieser beiden Arten von Arbeit nur ein geringer Teil der zugeführten Wärme verbraucht. Der größte Teil derselben bewirkt eine Erhöhung der Temperatur, d. h. eine Steigerung der Geschwindigkeitsenergie der Moleküle.

§ 185. Beim weiteren Fortschreiten der Erwärmung und der Ausdehnung erreichen die Moleküle schließlich einen solchen Abstand von einander, daß sie nicht mehr durch die Kohäsionskraft gezwungen werden, um die neue Gleichgewichtslage hin und her zu schwingen. Die Moleküle üben zwar noch eine Anziehung aufeinander aus, allein dies hindert nicht, daß sie sich gegeneinander verschieben. Der Körper hat jetzt keine bestimmte Form mehr, er ist in den flüssigen Zustand übergegangen. Der Übergang erfolgt, wenn die Moleküle in einen gewissen gegenseitigen Abstand gekommen sind, d. h. wenn die Schwingungen der Moleküle eine bestimmte Größe und Geschwindig-

Digitized by Google

keit erreicht haben. Aber die Kohäsionskraft ist bei verschiedenen festen Körpern verschieden, und diese schmelzen daher nicht bei demselben molekularen Bewegungszustande. Dagegen schmilzt ein und derselbe feste Körper immer bei demselben molekularen Bewegungszustande, d. h. bei derselben Temperatur. Der Schmelzpunkt eines festen Körpers ist konstant.

Der Schmelzpunkt ist jedoch, wie wir gesehen haben, von dem Druck abhängig, der auf dem festen Körper ruht. So schmilzt z. B. das Eis bei einer Temperatur unter 0° (vgl. § 45), wenn es einem großen Druck unterworfen wird. Der Schmelzpunkt des Schwefels dagegen steigt, wenn der Druck erhöht wird (§ 46). Dies hängt mit den beim Schmelzen eintretenden Volumänderungen zusammen. Das Eis zieht sich beim Schmelzen zusammen, der Schwefel dagegen dehnt sich aus (§ 46). Durch erhöhten Druck wird das Volum des Eises vermindert, und die molekulare Veränderung, die mit dem Schmelzen gleichbedeutend ist, kann daher bei niedrigerer Temperatur, d. h. bei einer geringeren molekularen Geschwindigkeitsenergie, hervorgebracht werden. Auch das Volum des Schwefels wird durch Druck vermindert. Aber dies hat zur Folge, daß die molekulare Veränderung schwieriger zustande kommt. Sie erfordert eine größere molekulare Geschwindigkeitsenergie, d. h. der Schmelzpunkt muß höher liegen. — Hier ergibt sich allerdings eine Schwierigkeit mit Rücksicht auf die gegebene Erklärung, daß der Vorgang des Schmelzens darin besteht, daß sich die Moleküle voneinander entfernen. Wenn sich nämlich das Eis beim Schmelzen auf ein kleineres Volum zusammenzieht, so müssen die Moleküle offenbar näher zusammenkommen. Und doch sollen sie in einen Zustand größerer Unabhängigkeit voneinander kommen. Dieser Widerspruch berührt jedoch die mechanische Wärmetheorie selbst nicht, wie leicht einzusehen ist, wenn man sich den folgenden Kreisprozeß denkt. In einem Zylinder befindet sich etwas Wasser und auf dieses drückt ein Kolben, der z. B. 500 kg wiegen möge. Das Wasser wird abgekühlt und gefriert. Dabei dehnt es sich aus und der Kolben wird gehoben. Dann wird dieser entfernt und Wärme zugeführt. Das Eis schmilzt und es entsteht Wasser von 0°. Bei diesem Kreisprozeß wird eine Arbeit ausgeführt, indem der Kolben von 500 kg gehoben wird. Diese Arbeit hat aber selbstverständlich Wärme gekostet, und daher ist zum Schmelzen des Eises mehr Wärme verbraucht worden, als das Wasser beim Gefrieren abgegeben hat. Die Wärmezufuhr ist größer als die Wärmeabgabe. Bei jedem derartigen Kreisprozeß muß aber die Temperatur, bei der die Wärme zugeführt wird, höher sein als die Temperatur, bei der die Wärme abgegeben wird. Die Wärme muß einen „Temperaturabfall“ haben. Da nun in diesem Fall die Wärme bei 0° zugeführt wird, muß sie bei einer Temperatur unter 0° abgegeben werden, d. h. der Schmelzpunkt des Eises lag unter 0°. Der auf das Wasser ausgeübte Druck hat also ein Sinken des Schmelzpunktes bewirkt. Das Entgegengesetzte findet beim Schwefel statt, da er sich beim Schmelzen ausdehnt.

§ 186. Einerlei ob der Schmelzpunkt durch Druck erhöht oder erniedrigt wird, das Schmelzen erfordert unter allen Umständen eine bedeutende innere

Digitized by Google

Arbeit, die nicht zur Erhöhung der Geschwindigkeitsenergie der Moleküle verbraucht wird, sondern zur Überwindung der Kohäsionskraft des festen Körpers. Zum Schmelzen von 1 kg Eis sind 80 Wärmeeinheiten erforderlich (§ 48), was einer Arbeit von 80 . 424 = 33 920 Meterkilogramm entspricht. Daß diese Wärmemenge nur dazu verbraucht wird, um die innere molekulare Veränderung zu bewirken, geht daraus hervor, daß während des Schmelzens die Temperatur nicht steigt. — Für andere Körper ist die Schmelzwärme, d. h. die innere Arbeit beim Schmelzen, geringer (§ 50).

Wenn ein Körper aus dem flüssigen in den festen Zustand übergeht, so erfolgt dieselbe molekulare Veränderung in entgegengesetzter Richtung. Jetzt muß nicht Arbeit auf die Moleküle verwendet werden, sondern jetzt führen diese selbst Arbeit aus, die als Wärme, d. h. als molekulare Geschwindigkeitsenergie auftritt.

§ 187. Auf der freien Oberfläche einer Flüssigkeit findet Verdampfung statt (§ 55), d. h. die Moleküle der Flüssigkeit gehen in den gasförmigen Zustand über. Solange sie der Flüssigkeit angehören, werden sie von einer Kohäsionskraft zusammengehalten, die allerdings viel geringer als die Kohäsionskraft in festen Körpern, aber doch sehr merklich ist. Es ist eine gewisse Kraft erforderlich, um Teile einer Flüssigkeit voneinander zu trennen, und wenn sie sich selbst überlassen werden, sammeln sie sich zu Tropfen an. Die Moleküle einer Flüssigkeit bewegen sich in ähnlicher Weise wie die Moleküle eines festen Körpers. Sie führen Schwingungen aus, deren Form durch die molekulare Wirkung der benachbarten Teilchen bestimmt wird. Eigentümliche Verhältnisse machen sich an der Oberfläche einer Flüssigkeit geltend, weil hier das Molekül nicht von allen Seiten von der Flüssigkeit umgeben ist. Die Moleküle der Oberfläche schwingen daher in anderer Weise als die Moleküle im Innern der Flüssigkeit. Sie trennen sich von der Flüssigkeit und gehen in die Luft (oder den luftleeren Raum) über. Ein solches Fortfliegen der Moleküle von der Oberfläche der Flüssigkeit findet immer statt, aber um so häufiger, je lebhafter die von den Molekülen ausgeführten Schwingungen sind. Wenn der Raum über der Flüssigkeit begrenzt ist, so prallen die losgerissenen Moleküle gegen die Begrenzung und werden ebenso wie elastische Kugeln zurückgeworfen, d. h. so, daß der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel ist. Einige der Moleküle kommen nach der Oberfläche der Flüssigkeit zurück und vereinigen sich wieder mit dieser. Sobald in einer gewissen Zeit ebensoviel Moleküle nach der Flüssigkeit zurückkehren, als sich in derselben Zeit von der Flüssigkeit trennen, ist der Zustand stationär und der Raum über der Flüssigkeit ist mit Dampf gesättigt (vgl. § 72). Der Dampf übt gegen die Begrenzung einen Druck aus, und dieser „Dampfdruck" wird durch das Anprallen der Moleküle gegen die den Raum begrenzenden Wände hervorgebracht.

§ 188. Wenn die Dampfbildung nicht nur auf der Oberfläche, sondern auch im Innern der Flüssigkeit stattfinden soll, wenn also die Flüssigkeit sieden soll (vgl. § 74), so muß die Temperatur derselben gesteigert werden

Digitized by Google

bis die Moleküle so stark schwingen, daß sie die Kohäsionskraft, die sie zusammenhält, überwinden und sich also nicht mehr gegenseitig anziehen. Außer der Kohäsionskraft muß auch der äußere Druck, der auf der Flüssigkeit ruht, und der die Moleküle der Flüssigkeit zusammenzuhalten strebt, überwunden werden. Daher steigt der Siedepunkt, wenn der äußere Druck größer wird; dagegen sinkt er, wenn der Druck kleiner wird (§ 82). Daß eine Flüssigkeit siedet, bedeutet also, daß die Moleküle derselben eine so große Geschwindigkeitsenergie besitzen, daß sie sich trotz der Kohäsionskraft und des äußeren Druckes von der Flüssigkeit trennen.

Damit dies geschehen kann, muß, ähnlich wie beim Schmelzen, eine bedeutende innere Arbeit geleistet werden, ja zum Verwandeln der Flüssigkeit in Dampf ist noch mehr Energie (oder Arbeit) erforderlich, als zum Verwandeln des festen Körpers in eine Flüssigkeit. Zum Verdampfen von 1 kg Wasser von 100° sind 540 Wärmeeinheiten erforderlich (§ 75), was einer Arbeit von $540 \cdot 424 = 228\,960$ Meterkilogramm entspricht. Eine „Pferdekraft" leistet in einer Sekunde eine Arbeit von 75 Meterkilogramm. Die innere Arbeit, welche zur Verwandlung von 1 kg Wasser von 100° in Dampf erforderlich ist, ist also gleich der Arbeit, die ein Pferd in $228\,960 : 75 = 3053$ Sekunden (50 Minuten und 53 Sekunden) leisten kann.

Wenn der Dampf wieder in den flüssigen Zustand übergeht, so kommt die innere Arbeit wieder zum Vorschein. Sie gibt sich in der erhöhten molekularen Bewegung (der Verdichtungswärme) zu erkennen.

§ 189. Für die Gase ist die Theorie der Molekularbewegung zu großer Vollkommenheit entwickelt, u. a. von Rudolf Clausius (§ 179). Eine eingehende Darstellung dieser Theorie liegt jedoch außerhalb des Rahmens dieses Buches, da sie mathematische Entwickelungen erfordert. Nur einige Ergebnisse dieser „kinetischen Gastheorie" sollen hier angeführt werden.

Man nimmt an, daß die Gasmoleküle (Luftmoleküle) in ununterbrochener Bewegung, und zwar nicht wie die Moleküle der flüssigen und festen Körper, in schwingender, sondern in geradliniger Bewegung begriffen sind. Wenn die Luft in einem Behälter eingeschlossen ist, so stoßen die Moleküle gegen die Wände desselben, und da die Stöße schnell aufeinander und gleichzeitig in großer Anzahl erfolgen, machen sie sich als ein stetig wirkender Druck bemerklich. Wird die Luft auf das halbe Volum zusammengedrückt (ohne daß sich die Temperatur ändert), so bekommt die Flächeneinheit der Wand des Behälters doppelt so viel Stöße als vorher in derselben Zeit. Infolgedessen verdoppelt sich der Druck (Boyle sches Gesetz, I, § 257). Wird dagegen die Luft erwärmt, ohne daß sie sich ausdehnen kann, so werden die Stöße kräftiger, da die Geschwindigkeit der Moleküle größer wird. Daher nimmt der Druck mit der Temperatur zu (vgl. § 34). Dies gilt für alle Luftarten. Eine eingehendere Betrachtung dieser Verhältnisse ist, wie wir später sehen werden, für die heutige Auffassung der inneren Beschaffenheit der Körper von großer Bedeutung.

Digitized by Google

Digitized by Google

Der Magnetismus.

Digitized by Google

Digitized by Google

Magnetismus. — Deklinationsnadel.

Entdeckungen und Erkenntnisse bis ungefähr 1600.

§ 190. Die Erze spielten bei den alten Kulturvölkern eine große Rolle und waren Gegenstand genauer Untersuchungen, denn aus den Erzen gewannen sie Metalle, die für die Anfertigung von Ackerbaugeräten und von Waffen unentbehrlich waren.

In besonders hohem Grade erregten seit den ältesten Zeiten gewisse Eisenerze die Aufmerksamkeit dadurch, daß sie die Eigenschaft besaßen, Eisen und eisenhaltiges Erz anzuziehen. Die ältesten griechischen Schriftsteller kennen ein solches anziehendes steinartiges Eisenerz und nannten es „den Stein" im Gegensatz zu gewöhnlichen Steinen und Erzen. Aristoteles erzählt, Thales von Milet habe geglaubt, „der Stein" besitze eine Seele, von welcher die Anziehung ausgehe, denn nur das Beseelte könne Bewegung hervorbringen. In alten griechischen Schriften wird das merkwürdige Erz auch „Herkulesstein" genannt. Der Name sollte wahrscheinlich die geheimnisvolle, aber mächtige Kraft des Steines ausdrücken, der sogar das unwiderstehliche Eisen beherrscht.

Später kamen diese Namen außer Gebrauch und das anziehende Erz wurde „Magnet" oder „Magnetstein" genannt, wahrscheinlich wegen seines Vorkommens in der Nähe der Stadt Magnesia in Kleinasien.

§ 191. Griechische Philosophen und Dichter erwähnen den Magnetstein als eines der merkwürdigsten Naturerzeugnisse. Wenn der Philosoph ein Bild für das Unverständliche oder der Dichter ein Bild für das Wunderbare braucht, so muß der Magnet seine Dienste leisten. Übrigens hatten die Griechen nur eine sehr oberflächliche Kenntnis seiner Eigenschaften. Alles was sie wußten, hat Platon in einem seiner Dialoge ausgesprochen, indem er den Sokrates sagen läßt: „Dieser Stein zieht aber nicht nur selbst einen eisernen Ring an, er legt zugleich seine Kraft in den Ring, so daß dieser wieder einen anderen eisernen Ring anziehen kann, und auf diese Weise können eine Anzahl von eisernen Ringen oder Eisenstücken aneinanderhängen; dies geschieht allein durch die Kraft des Magnetsteins." Die Griechen hatten also beobachtet, daß der Magnetstein das Eisen anzieht und dieses auch zugleich mag-

Digitized by Google

netisch macht, so daß der eine Ring den anderen trägt (Fig. 154). Wenn aber der Magnet entfernt wird, so verliert auch das Eisen seine Kraft, denn sie war nur deshalb im Eisen, weil der Magnet in der Nähe war. — Wahrscheinlich haben die Griechen auch gewußt, daß die Kraft des Magneten durch andere Körper hindurchdringt. Lucrez (95 bis 55 v. Chr.), ein römischer Schüler der griechischen Philosophen, schreibt nämlich, daß Eisenstücke, die in einem kupfernen Topfe liegen, magnetisch werden, d. h. sich gegenseitig anziehen, wenn ein Magnet unter den Topf geschoben wird.

Fig. 154.

Anziehungskraft des Magnetsteins.

Übrigens verlegten die Griechen und Römer viele Fabeln über den Magnetstein und seine Kraft nach Indien, welches bereits bei Beginn unserer Zeitrechnung das Wunderland war, von dem das Unglaubliche nicht nur erzählt, sondern auch geglaubt wurde. Plinius erzählt von zwei Bergen am Indus, von denen der eine die Eigenschaft hat, Eisen festzuhalten, während der andere das Eisen abstößt. Einer, der mit eisenbeschlagenen Schuhen auf dem einen Berge steht, kann daher seinen Fuß nicht erheben, während die eisenbeschlagenen Schuhe von dem anderen Berge mit unwiderstehlicher Kraft abgestoßen werden. Äußerst gefährlich war es, sich dem anziehenden Berge mit einem Schiffe zu nähern, denn die Nägel wurden aus den Planken des Schiffes herausgezogen, so daß diese auseinanderfielen.

§ 192. Die alten Fabeln deuten übrigens in der richtigen Richtung, wenn es sich darum handelt, das Land zu finden, wo die Eigenschaften des Magnetsteins am längsten bekannt waren. Früher als alle anderen Völker verstanden es die Chinesen, das östlichste der alten Kulturvölker, den Magnetstein zu nützlichen Bestimmungen zu gebrauchen. Die Griechen und Römer hatten ihn im Dienste der Heilkunde als Mittel gegen Schwermut, Magerkeit, Gicht und Krampf angewandt, allein dies beruhte nur auf abergläubischen Vorstellungen über seine Kraft. Derartige Mittel sind ebenso wertlos wie der Gebrauch magnetischer Instrumente bei der Behandlung von Zahn-, Ohren- und Augenleiden. Und wenn die Alten glaubten, man könne sich die Gunst der Welt und eine hinreißende Beredsamkeit erwerben, wenn man stets einen Magneten bei sich trage, so findet man wohl auch heute noch ähnliche Ideen, die keineswegs frei von Aberglauben sind. — Die Chinesen nannten den Magneten „thsu schy", d. h. den liebenden Stein, „denn er zieht das Eisen an sich, ebenso wie eine zärtliche Mutter ihre Kinder an sich zieht". Die Chinesen wußten, daß ein Stab aus gehärtetem Eisen (Stahl) dauernd

Digitized by Google

magnetisch wird, wenn er mit einem Magnetstein gestrichen wird. Die Kraft dieses Magneten verschwindet nicht, wenn der Magnetstein entfernt wird. — Ferner war es eine den alten Chinesen wohlbekannte Tatsache, daß sich eine durch Streichen magnetisierte Nadel aus gehärtetem Eisen ziemlich genau in die Richtung nach Süden stellte, wenn sie so aufgehängt wurde, daß sie sich in horizontaler Lage frei bewegen konnte. Wurde die Nadel aus dieser Richtung herausgedreht, so kehrte sie immer wieder in dieselbe zurück (Fig. 155).

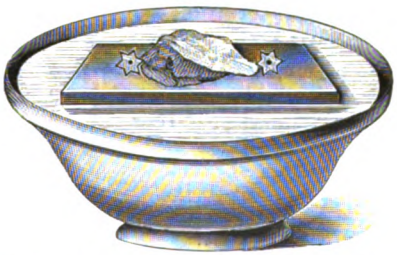
Fig. 155.

Richtungsnadel.

§ 193. Über die Art und Weise, wie diese Entdeckungen gemacht worden sind, weiß man nichts Bestimmtes. Die Chinesen selbst behaupten, die Richtungsnadel, welche heute Kompaß genannt wird, sei bei ihnen länger als 2000 Jahre v. Chr. in Gebrauch gewesen. Dies ist jedoch vielleicht eine Übertreibung. Dagegen steht es fest, daß der chinesische Schriftsteller Hiu-tschin im Jahre 121 v. Chr. in seinem berühmten Wörterbuche sagt, daß Magnet „der Name eines Steines ist, der der Nadel Richtung geben kann".

Die Kompaßnadel hieß bei den Chinesen „Südweiser". Wahrscheinlich ist der älteste „Südweiser" nicht eine magnetisierte eiserne Nadel (ein künstlicher Magnet), sondern ein Magnetstein gewesen. Es bietet nämlich durchaus keine Schwierigkeit, einen natürlichen Magnetstein so zuzuhauen, daß er als Richtungsnadel dienen kann, wenn man ihn auf ein Brett legt, welches auf Wasser schwimmt. Das Brett dreht sich dann infolge der richtenden Kraft des Magnetsteins so, daß eine bestimmte Linie des Steins von Norden nach Süden gerichtet ist. Fig. 156 stellt eine solche Richtungsnadel vor. Die Nord-Südlinie geht von dem einen Stern zum anderen. Das Brett wird nicht nach dem Rande hingezogen, indem die Kraft des Magnetismus nur eine Drehung bewirkt (vergl. § 216).

Fig. 156.



Ein richtungsweisender Magnetstein (Bild aus dem Jahre 1646).

§ 194. Die Europäer haben den Kompaß wahrscheinlich durch Vermittelung der Araber kennen gelernt. Die älteste Beschreibung stammt von dem arabischen Gelehrten Bailak (1242). Er schreibt: „Die Schiffer, welche das syrische Meer befahren, stellen unten im Schiff, wo der Wind nicht bläst, ein mit Wasser gefülltes Faß auf, wenn sie in dunkeln Nächten, in denen die Sterne nicht sichtbar sind, die Himmelsgegenden bestimmen wollen. Auf

Digitized by Google

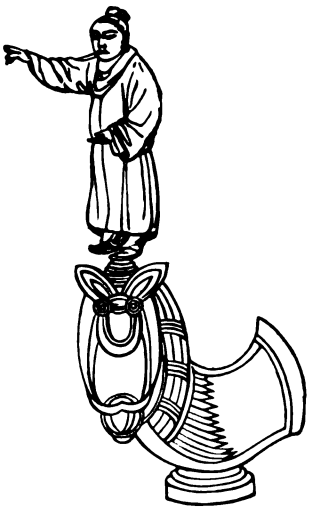
das Wasser legen sie eine Nadel, die in einem Holzkreuz befestigt ist, und wenn sich das Holzkreuz frei drehen kann, so zeigt die Nadel Norden und Süden." — Eine derartige Nadel bewegt sich jedoch etwas träge, da das Wasser einen bedeutenden Widerstand leistet. Kepler (I, § 72), der über den Kompaß schrieb, gab dem Schwimmer eine etwas andere Form, bei der der Reibungswiderstand des Wassers weniger störend war. Die Nadel wird von einem birnförmigen Behälter getragen (Fig. 157), und der Reibungswiderstand läßt sich noch weiter dadurch vermindern, daß man als Flüssigkeit ein Gemisch von Wasser und Spiritus verwendet.

Fig. 157.

Keplers Richtungsnadel.

§ 195. Die ältesten chinesischen Erzählungen über den „Südweiser" knüpfen sich jedoch nicht an schwimmende Nadeln, sondern an die sogenannten magnetischen Wagen, die der Sage nach 2000 Jahre vor unserer Zeitrechnung in Gebrauch gewesen sein, dann aber verloren gegangen und erst im 3. Jahrhundert n. Chr. wieder zum Vorschein gekommen sein sollen. Der magnetische Wagen hatte einen Südweiser, der in einer menschlichen Figur verborgen war, die sich leicht um eine vertikale Achse drehen konnte. Die Figur bestand aus Nephrit,

Fig. 158.



Chinesischer Südweiser.

Fig. 159.

Magnetischer Wagen aus Japan.

einem in China vorkommenden Mineral, und deutete, wohin auch der Wagen gerichtet war, mit ausgestrecktem Arm nach Süden. Im Arm ist die richtende

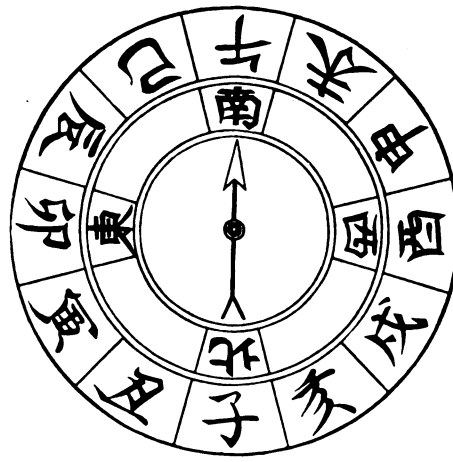
Digitized by Google

Magnetnadel verborgen. Die Fig. 158 und 159 stellen einen chinesischen Südweiser und einen magnetischen Wagen aus Japan vor, dessen Könige diesen nützlichen Apparat von den Chinesen im 7. Jahrhundert kennen lernten.

Mit Hilfe dieser Wagen konnten die Kaiser von China den Weg durch die ausgedehnten unbewohnten Strecken in ihrem Reiche finden. Die Nadel gab nämlich fortwährend an, in welcher Richtung sich der Wagen bewegte. Außerdem war der Wagen mit einem Zählwerk versehen, durch welches die Anzahl der Umdrehungen der Räder angegeben wurde. Jedesmal wenn eine Meile zurückgelegt war, schlug eine kleine Figur an eine Glocke, und nach jeder zehnten Meile wurde von einer zweiten Figur eine andere Glocke angeschlagen. Der magnetische Wagen gab also nicht nur die Richtung, sondern auch die Länge des zurückgelegten Weges an.

§ 196. Die Magnetnadel diente bei den Chinesen auch als fester Wegweiser. Eine richtige Verwendung fand sie ferner bei der Feststellung der Richtung, in der ein Haus erbaut werden sollte. Dies war eine feierliche Handlung, die von einem Magier ausgeführt wurde. Das Glück des Hauses hing in nicht geringem Grade von der Genauigkeit ab, mit der die Richtung bestimmt wurde. Diese brauchte nicht notwendigerweise die Nordsüdrichtung zu sein. Auch andere Richtungen konnten ihre Bedeutung und ihren glückbringenden Einfluß haben. Es kam daher eine Teilung in Gebrauch, vermittelst deren man die verschiedenen Richtungen in bezug auf Norden und Süden bestimmen konnte. Fig. 160 stellt eine alte japanische Kreisteilung vor. Die Magnetnadel hat die Form eines Pfeils und deutet mit der Spitze nach Süden. Der innere Kreis gibt die vier Himmelsgegenden Süd, Ost, Nord und West an. Der äußere Kreis ist in zwölf Teile eingeteilt, deren jeder mit einem Zeichen versehen ist, welches den Namen eines Tieres bedeutet. Dieselben zwölf Zeichen finden sich in Fig. 161 (a. f. S.), einer chinesischen Einteilung mit drei Kreisen, von denen der äußerste die den zwölf Zeichen entsprechenden Tiere darstellt. Norden hat die Ratte als Zeichen, Osten den Hasen, Süden das Pferd und Westen das Huhn. Der innerste Kreis der Fig. 161 enthält die wissenschaftlichen Zeichen für die acht Windrichtungen, Nord, Nordost, Ost u. s. w.

Fig. 160.



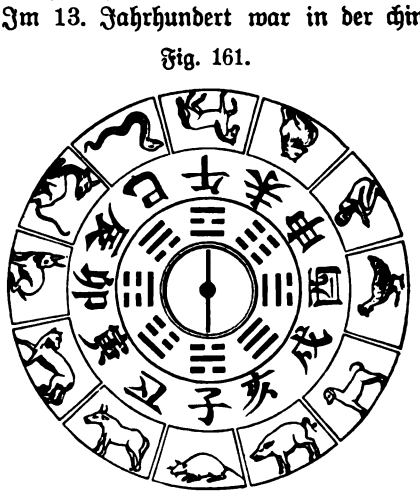
Magnetnadel mit japanischer Kreisteilung.

§. 197. Im Dienste der Seefahrt ist der Kompaß erst später in Gebrauch gekommen. Doch ist es nicht unwahrscheinlich, daß die Chinesen im

Digitized by Google

8. Jahrhundert n. Chr. auf ihren langen Seefahrten von Kanton über Ceylon bis zum persischen Golf ihre Schiffe mit Hilfe des Kompasses gesteuert haben. Im 13. Jahrhundert war in der chinesischen Marine der Kompaß allgemein in Gebrauch. Eine im Jahre 1297 erschienene chinesische Schrift gibt nämlich den Kurs der Schiffe durch die Richtung der Magnetnadel an.

Fig. 161.



Chinesische Kreisteilung.

In demselben Jahrhundert war der Kompaß auch in den Mittelmeerländern bekannt, und das Gerücht von demselben war mindestens ein Jahrhundert früher nach Frankreich gedrungen, denn er wird in einem Gedichte von Guyot de Provins aus dem Jahre 1190 erwähnt. Es ist daher nur eine Sage, wenn erzählt wird, Flavio Gioja aus Pasitano bei Amalfi habe am Anfang des 14. Jahrhunderts den Kompaß erfunden und in Europa eingeführt. Wenn er überhaupt irgendwelche Verdienste in dieser Richtung hat, so mag es wohl sein, daß er den Kompaß auf den neapolitanischen Schiffen eingeführt hat. Wenn man aus diesem Grunde sein Andenken geehrt hat, so ist dies sehr erklärlich, da die Einführung des Kompasses die Entwickelung der Seefahrt außerordentlich gefördert hat.

§ 198. Die Entdeckung, daß sich die Magnetnadel in die Richtung von Norden nach Süden stellt, muß alsbald weitere Entdeckungen zur Folge gehabt haben. Die Chinesen bestrichen das Ende der Nadel, welches nach Süden deutet, mit roter Farbe. Sie waren also darüber im klaren, daß die beiden Enden der Nadel voneinander wesentlich verschieden sind, daß es immer dasselbe Ende ist, welches nach Süden deutet. Diese Eigenschaft der Nadel führte später dazu, daß man das nach Süden gerichtete Ende den Südpol, das andere den Nordpol nannte.

Selbstverständlich wußten die Chinesen, daß beide Pole Eisen anziehen, aber zugleich haben sie jedenfalls auch beobachtet, daß die beiden Pole zueinander ein ganz eigentümliches Verhalten zeigen. Wenn man nämlich zwei Richtungsnadeln nebeneinander hat, kann man wohl schwerlich übersehen, daß die beiden Südpole und ebenso die beiden Nordpole sich gegenseitig abstoßen, während ein Südpol und ein Nordpol sich einander anziehen. Gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an. Es gibt also nicht nur eine magnetische Anziehung (Wirkung des Magnetpols auf Eisen), sondern auch eine magnetische Abstoßung. Dieses merkwürdige Verhalten wird zum erstenmal von Lucrez (§ 190) erwähnt, und der griechische Geschichtschreiber Plutarch (50 bis 120) erzählt, die Ägypter hätten dem Magneten

Digitized by Google

die Namen Horus und Typhon, die Symbole der Vereinigung und Trennung beigelegt. Hieraus kann man schließen, daß die Ägypter sowohl die Anziehung als auch die Abstoßung der Magnetpole gekannt haben. Einige Klarheit kam jedoch in diese interessante Sache erst nach dem Wiederaufleben der Wissenschaften in Westeuropa.

§ 199. Die Chinesen verstanden sich besonders auf die Verwendung der Magnetnadel als „Südweiser", dessen Stellung sie mit großer Aufmerksamkeit beobachteten. Dabei machten sie die Entdeckung, daß die Nadel nicht genau nach Süden und Norden deutet. In einer chinesischen Schrift aus dem 11. Jahrhundert heißt es: „Die Magier streichen die Nadel mit dem Magnetstein, und diese kann dann nach Süden weisen, allein sie zeigt doch immer ein wenig nach Osten und ist also nicht genau nach Süden gerichtet."

Es dauerte lange, bis die Europäer die Abweichung der Magnetnadel von der Nordsüdlinie entdeckten. Vielleicht hatte dies seinen Grund darin, daß die ältesten europäischen Kompasse nicht mit einer Kreisteilung versehen waren, zum Teil auch darin, daß zur Zeit der Einführung des Kompasses in den Mittelmeerländern die Abweichung der Nadel von der Nordsüdlinie sehr gering war. Mit voller Klarheit wurde die Abweichung der Kompaßnadel erst während der Fahrt des Columbus über das Atlantische Meer erkannt. Er berichtet nämlich, daß er am 14. September 1492, als er bei Sonnenuntergang bestimmte, wo er sich befand (200 Meilen westlich von Ferro), zu seinem großen Erstaunen bemerkt habe, daß die Nadel von der Nordsüdrichtung um $5^1/_2{}^0$ nach Westen abwich. Merkwürdigerweise erwähnt er nicht, daß damals die Nadel im Mittelmeere ungefähr 6° nach Osten abwich. Man kann doch kaum annehmen, daß diese Abweichnung noch im Jahre 1492 unbekannt gewesen sei. Es ist daher zweifelhaft, ob sich Columbus darüber wunderte, daß die Richtung der Nadel nicht mit der Richtung der Nordsüdlinie zusammenfiel, oder darüber, daß die Nadel nach Westen, und nicht nach Osten abwich. Aber wie auch seine Verwunderung zu deuten sein mag, jedenfalls wurde durch seinen Bericht die Aufmerksamkeit auf die Frage nach der Richtung der Magnetnadel gelenkt. Daß Columbus jedenfalls nach seiner Rückkehr Beobachtungen über die Richtung der Kompaßnadel angestellt hat, geht aus einem Briefe hervor, den er einige Jahre später von Haiti schrieb und in dem die folgende Stelle vorkommt: „Jedesmal, wenn ich von Spanien nach (West-) Indien segle, bemerke ich, wenn ich 100 Seemeilen westlich von den Azoren angekommen bin, eine außerordentliche Veränderung in den Bewegungen der Himmelskörper, in der Temperatur der Luft und in der Beschaffenheit des Meeres. Ich habe diese Veränderungen sorgfältig aufgezeichnet und gefunden, daß der Kompaß, der bis dahin nach Nordosten abwich, sich jetzt nach Nordwesten hinüberbewegte, und als ich über diesen Strich hinausgekommen war, der wie ein Bergrücken ist, so ist das Meer mit Tang angefüllt, der mit Tannenzweigen Ähnlichkeit hat und pistazienartige Früchte trägt."

Columbus erwähnt hier den Übergang von östlicher zu westlicher Ab-

Digitized by Google

weichung von der Nordsüdlinie als eine von den vielen Veränderungen in den Naturverhältnissen, die er auf dem Wege von der Alten zur Neuen Welt beobachtete. Er weiß also nicht nur, daß die Magnetnadel eine Abweichung (Deklination) hat, sondern auch, daß diese an verschiedenen Orten verschieden ist. In Spanien wich die Nadel nach Osten ab, aber an einer gewissen Stelle jenseits der Azoren hatte sie sich nach Westen „hinüberbewegt". Es muß also auf dem zurückgelegten Wege irgendwo eine Stelle gewesen sein, wo die Nadel genau nach Norden deutete, wo, mit anderen Worten, die Abweichung gleich Null war.

Unabhängig von Columbus sollen Giovanni Caboto und sein Sohn Sebastian die Abweichung der Magnetnadel beobachtet haben, als sie 1497 über das Atlantische Meer segelten und ein Jahr früher als Columbus das amerikanische Festland erreichten.

§ 200. Es waren also die großen Entdeckungsreisen, die zur Erkenntnis der Deklination führten. Es waren Seeleute, die diese interessanten und für die Schiffahrt außerordentlich wichtigen Verhältnisse entdeckten. Aber es hielt schwer, die Gelehrten zur Anerkennung dieser Tatsache zu bewegen. Sie konnten sie nicht mit ihren Theorien in Einklang bringen, die von der Voraussetzung ausgingen, daß die Magnetnadel genau nach Norden deutet. Noch 50 Jahre nach Columbus' erster Reise behauptete ein spanischer Mathematiker, die beobachteten Abweichungen seien nur auf mangelhafte Beschaffenheit der betreffenden Kompaßnadeln zurückzuführen. Da jedoch auf jeder neuen Seefahrt dieselben Beobachtungen gemacht wurden, konnte die Zuverlässigkeit dieser Beobachtungen auf die Dauer nicht in Zweifel gezogen werden. Dazu kam, daß die Abweichung auch auf dem Festlande an verschiedenen Orten beobachtet wurde. Der Geograph Heinrich Loreti erwähnt die Abweichung in einer Schrift aus dem Jahre 1536, und in demselben Jahre ermittelte Georg Hartmann die Größe der Abweichung in Nürnberg und fand, daß sie $10^1/_4{}^\circ$ östlich war.

Hartmann (1489 bis 1564), der ursprünglich Mechaniker war, aber später Geistlicher wurde, hatte Italien bereist und auch hier die Stellung der Magnetnadel beobachtet. In einem Briefe (1544) an den Herzog Albrecht von Preußen schrieb er nämlich, die Abweichung sei in Nürnberg 10°, in Rom dagegen nur 6°. — Sechs Jahre später (1550) teilte Professor Finée in Paris mit, daß dort die Abweichung 8° östlich sei, und Robert Norman (§ 201) berichtet, daß 1576 in London die Abweichung 11° östlich war.

§ 201. Man kannte also am Ende des 16. Jahrhunderts die Abweichung für verschiedene Orte. Aber was war die Ursache dieser Erscheinung?

Zur Zeit des Columbus war die Ansicht allgemein verbreitet, daß am Himmel ein anziehender Punkt existiere. Columbus selbst glaubte, der Polarstern richte die Magnetnadel. Es waren jedoch auch andere Vermutungen ausgesprochen worden. Fracastoro (I, § 103) nahm z. B. an, der anziehende

Digitized by Google

Punkt liege auf der Erde, und zwar im hohen Norden, und Olaus Magnus (1490 bis 1558), der in Italien starb, phantasierte davon, daß in der Nähe des Nordpols große magnetische Berge seien, die die Kraft besitzen, die Nägel aus den Schiffen zu ziehen und die auch die Magnetnadel richten. Es sind die alten griechischen Fabeln von den indischen Magnetbergen, die hier wieder auftauchen.

Der erwähnte Robert Norman war ebenfalls der Ansicht, daß die richtende Kraft von einem Punkte der Erde ausgehe, aber er hatte bessere Gründe für seine Annahme.

Norman, der Seemann und Kompaßmacher war, wußte wahrscheinlich, daß sich das Nordende der Nadel in hohen Breitengraden nach unten neigt. Jedenfalls war die Neigung der Kompaßnadel (Inklination) von Georg Hartmann beobachtet worden, denn er schreibt in dem erwähnten Briefe an den Herzog Albrecht ungefähr folgendermaßen: „Außerdem finde ich, daß die Magnetnadel nicht nur östlich von Mitternacht weist, sondern sie weist auch nach unten. Dies kann in folgender Weise gezeigt werden. Ich hänge eine Nadel von der Länge eines Fingers so auf, daß sie wagerecht auf einer Spitze stehen kann. Sie neigt sich also nicht gegen die Erde, weder mit dem einen, noch mit dem anderen Ende. Aber sobald ich das eine Ende (mit einem Magneten) streiche, so bleibt die Nadel nicht wagerecht stehen, sondern sie senkt sich mehr oder weniger. Über die Ursache hiervon kann ich Euer Königlichen Hoheit nichts mitteilen." — Norman untersuchte die Sache besser, indem er die Nadel so aufhängte, daß sie sich um eine durch den Schwerpunkt gehende Achse frei drehen konnte. Dadurch war die Möglichkeit ausgeschlossen, daß sich die Nadel durch den Einfluß ihres Gewichtes drehte. Norman fand, daß eine in dieser Weise aufgehängte Nadel sich mit dem Nordende so nach unten stellte, daß sie mit der horizontalen Linie einen Winkel von 70° 50′ bildete. — Dies zeigte deutlich, daß sich der anziehende Punkt nicht am Himmel, sondern eher an einer Stelle im Inneren der Erde befand.

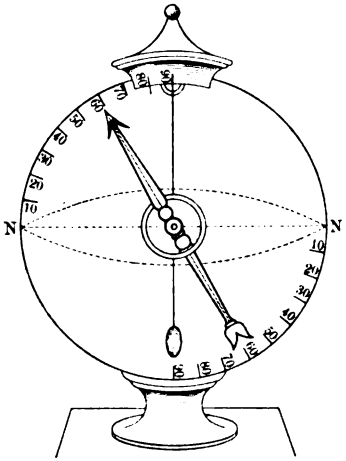
§ 202. Wir haben nun zwei verschieden aufgehängte Magnetnadeln kennen gelernt. Die eine dreht sich in einer horizontalen Ebene, einerlei ob sie auf einer Spitze ruht (Fig. 155) oder ob sie von einem auf Wasser schwimmenden Körper getragen wird (Fig. 157). Die andere dreht sich in einer vertikalen Ebene. Die erste heißt Deklinationsnadel (Abweichungsnadel, Kompaßnadel), die zweite Inklinationsnadel (Neigungsnadel). — Die Richtung, in welche sich die Deklinationsnadel einstellt, wird als magnetische Nordsüdlinie oder als magnetischer Meridian bezeichnet. Der magnetische Meridian muß bekannt sein, wenn die Inklination gemessen werden soll, denn die Inklinationsnadel kommt nur dann in die richtige Stellung, wenn sie sich in derjenigen vertikalen Ebene drehen kann, die den magnetischen Meridian enthält.

Wenn übrigens die Magnetnadel an einem feinen und leicht biegsamen

Digitized by Google

Faden aufgehängt wird, so stellt sie sich von selbst in den magnetischen Meridian und nimmt in diesem die richtige Neigung an (Fig. 162).

Fig. 162.



Inklinationsnadel aus dem Jahre 1646.

§ 203. Die Annahme Normans, daß der anziehende Punkt unter der Erdoberfläche liege, war bedeutend besser begründet als die Vorstellungen von magnetischen Bergen in der Nähe des geographischen Nordpols, allein Norman bearbeitete die Sache nicht weiter und sprach sich über seine Ansichten nicht näher aus. — Es ist sehr leicht möglich, daß er sich gar keine bestimmte Ansicht über die Natur der Anziehung gemacht hat, sondern daß er sich damit begnügt hat, darauf hinzuweisen, daß die Richtung der Magnetnadel nicht auf Anziehung nach oben, sondern vielmehr auf eine Anziehung nach unten hindeutet.

Die meisten Forscher müssen sich damit begnügen, in ihren Schriften Einzelheiten nachzuweisen; nur wenigen glückt es, einen tieferen Zusammenhang der nach und nach beobachteten einzelnen Tatsachen zu erkennen. Auf dem Gebiete des Magnetismus war es William Gilbert, der das gesamte Wissen vom Magneten und seinen Eigenschaften übersah und ein gutes Stück weiterbrachte.

William Gilbert.

§ 204. William Gilbert war 1540 in Colchester geboren. Er studierte in Oxford und Cambridge Medizin, unternahm Reisen ins Ausland, ließ sich 1573 als praktischer Arzt in London nieder und wurde Leibarzt der Königin Elisabeth. In dieser Stellung hatte er hinreichend Zeit und Gelegenheit, sich mit wissenschaftlichen Untersuchungen und Studien zu beschäftigen. Auch kam er mit Lord Francis Bacon (I, § 167) in Berührung, dem er jedenfalls bei seinen Studien manche Anregungen verdankte. Jedenfalls betätigte er Bacons Ideen über die Naturforschung in glänzender Weise, weit besser als Bacon selbst (I, § 167).

Gilbert war ein würdiger Zeitgenosse Galileis. Von demselben Forschergeist beseelt, erreichte er zwar Galilei nicht in dem Geschick, die durch die Versuche gewonnenen Resultate zu erklären, dagegen war er ihm in der Kunst des Experimentierens überlegen. Was Galilei für die alten, reich ausgestatteten Wissenschaften, die Astronomie und die Mechanik, war, das war Gilbert für die neuen, wenig entwickelten Wissenschaften des Magnetismus und der Elektrizität. Ja, Gilbert machte den Magnetismus und

Digitized by Google

die Elektrizität, die bisher nur „Künste“ gewesen waren, zu Wissenschaften. — Er starb 1603.

§ 205. **Gilberts Buch** über Magnetismus (und Elektrizität) erschien im Jahre 1600 in London. In diesem Buche erklärt er die Erde für einen

Fig. 163.

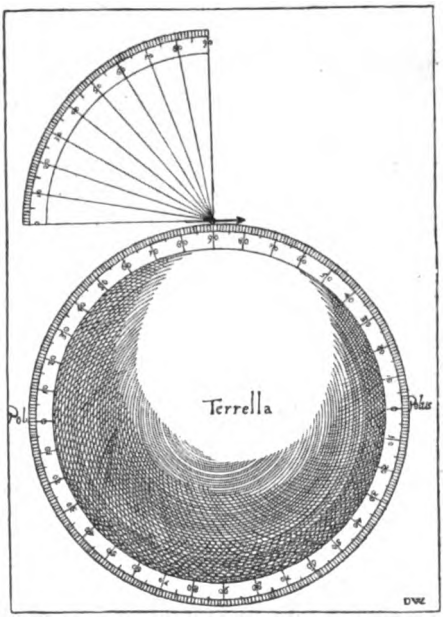
Schmieden von Magneten. (Aus Gilberts Buch „De Magnete“.)

großen Magneten, der ebenso wie ein Stahlmagnet seinen Nordpol und seinen Südpol hat. Diese magnetischen Pole fallen nach seiner Ansicht mit

Digitized by Google

den geographischen Polen zusammen. Er spricht nicht, wie Norman, von einem einzelnen Zentrum der magnetischen Anziehung, er betrachtet den ganzen Erdkörper als einen Magneten, der als solcher auch auf einen Magneten wirken muß, der sich auf seiner Oberfläche befindet. — Um die Richtigkeit seiner Theorie zu beweisen, magnetisierte er eine Stahlkugel so, daß sie an zwei diametral gegenüberliegenden Punkten die Pole bekam. Diesen kugelförmigen Magneten nannte er eine Terrella, d. h. eine kleine Erde, und durch Annäherung einer kleinen leicht beweglichen Magnetnadel konnte er veranschaulichen, welche verschiedenen Stellungen die Magnetnadel an verschiedenen Punkten der Erdoberfläche einnimmt. Mit der Terrella zeigte er, daß die Inklination (Neigung) von den Polen nach dem Äquator hin abnimmt. Am Äquator selbst ist sie gleich Null, d. h. die Nadel steht horizontal. Damals war die Größe der Inklination nur von London bekannt. In Paris wurde sie zuerst im Jahre 1671 und in Berlin im Jahre 1755 gemessen. Gilbert hatte daher keine Beobachtungen, auf die er sich stützen konnte. Er zog seine Schlüsse aus dem Verhalten der Terrella, und seine Schlüsse waren richtig. Die Inklination nimmt nach Süden hin ab und nach Norden hin zu. Fünf Jahre nach Gilberts Tode, also im Jahre 1608, beobachtete der Entdeckungsreisende Hudson, nach welchem die Hudsonbai benannt ist, daß unter 75° 22′ nördlicher Breite die Inklination 89° 30′ war, während sie um dieselbe Zeit in London ungefähr nur 72° war.

Fig. 164.



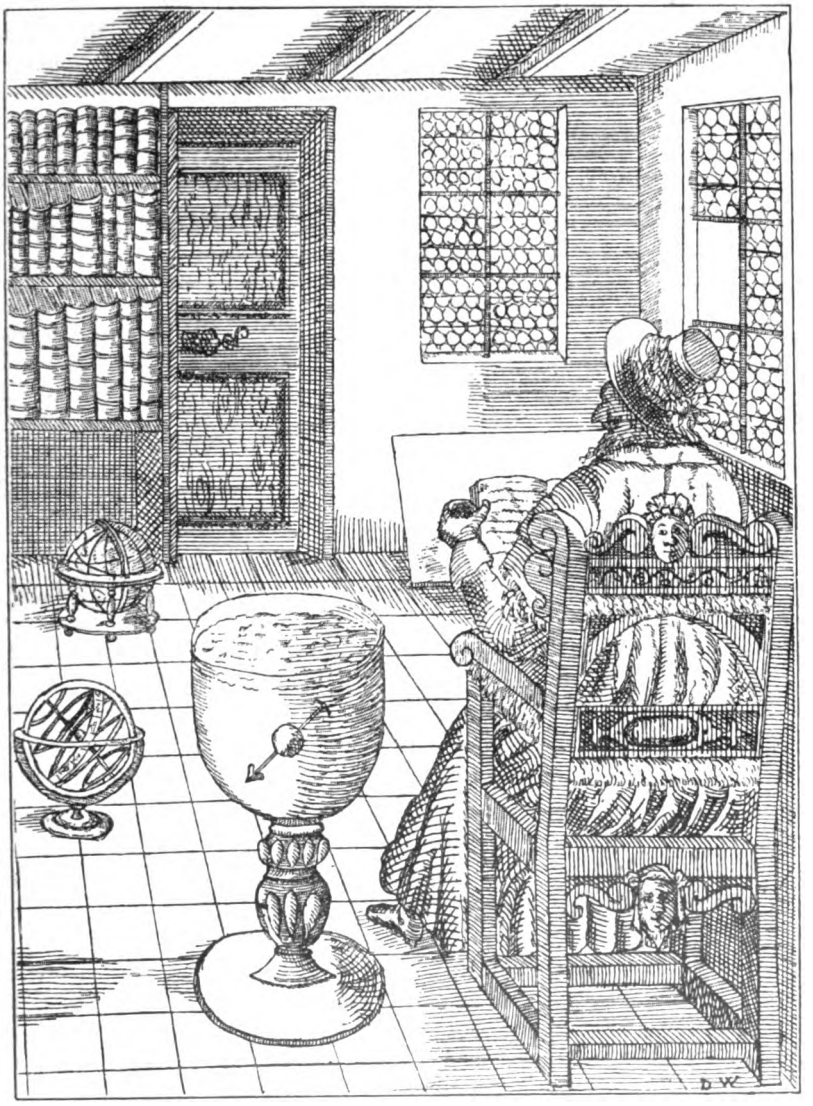
Gilberts Terrella.
(Aus Gilberts Buch „De Magnete“.)

§ 206. Was die Lage der magnetischen Pole betrifft, so hat sich die Ansicht Gilberts, daß sie mit den geographischen Polen zusammenfallen, als irrtümlich erwiesen. Er hatte keine hinreichende Kenntnis von der Richtung der Magnetnadel an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche, um sichere Schlüsse ziehen zu können. Die magnetischen Pole fallen nicht mit den geographischen Polen zusammen, und der magnetische Äquator, d. h. die Linie, auf welcher die Inklination gleich Null ist, fällt nicht mit dem geographischen Äquator zusammen. Die magnetischen Verhältnisse sind bei weitem nicht so regelmäßig, wie Gilbert aus seiner Terrella schließen zu können glaubte. Er glaubte z. B., man könne die geographische Breite (Polhöhe, I, § 46) eines

Digitized by Google

Ortes aus der Inklination ableiten. Dies ist jedoch, wie wir alsbald sehen werden, keineswegs der Fall. Hier hat sich Gilbert vielleicht etwas zu stark von dem Gedanken an die große Bedeutung beherrschen lassen, welche

Fig. 165.



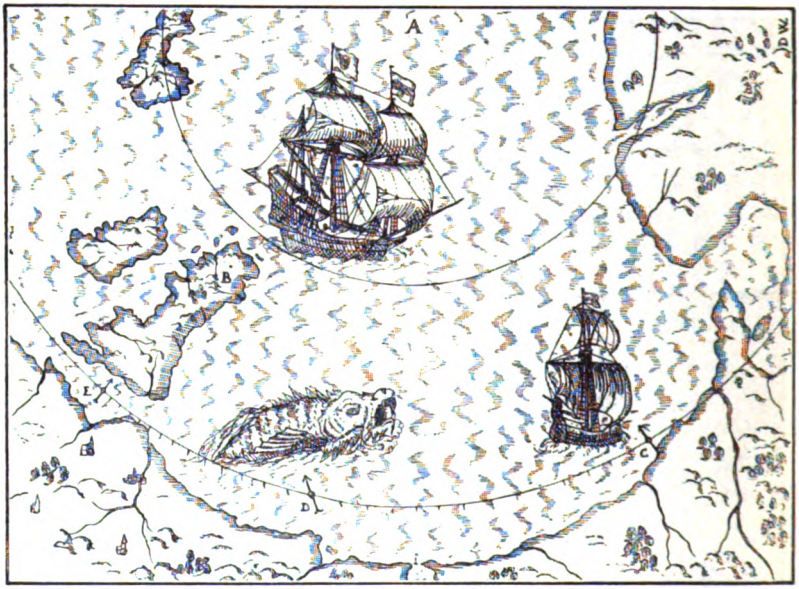
Inklinationsnadel an einer Holzkugel befestigt in Wasser schwebend.
(Bild aus Gilberts Buch „De Magnete".)

die Herleitung der Breite aus der Inklination für die Seefahrt haben würde. Er war sich nämlich klar darüber, daß die unregelmäßige Gestalt der Erd-

Digitized by Google

oberfläche einen ſtarken Einfluß auf die Deklination, alſo auf die horizontale Richtung der Magnetnadel ausübt. Hier machte er nun eine Annahme, durch die auch die auf den Seereiſen nach Amerika gemachten Beobachtungen ihre Erklärung finden ſollten. Er nahm nämlich an, nur der feſte Teil der Erdkugel ſei magnetiſch, das Waſſer dagegen ſei unmagnetiſch. Daher muß die Deklination in Europa und dem nach der europäiſchen Küſte hin liegenden Teile des Atlantiſchen Ozeans öſtlich ſein, weil hier die großen Landmaſſen

Fig. 166.



Gilberts Karte (aus „De Magnete“), in der die Richtung der Magnetnadel angegeben iſt.

nach Oſten hin liegen. Kommt man aber weiter in den Ozean hinaus, ſo deutet die Nadel genau nach Norden, da ſich hier der ſtörende Einfluß der Landmaſſen nicht bemerkbar macht. Nähert man ſich aber dem amerikaniſchen Feſtlande, ſo weicht die Nadel aus der Nordrichtung nach Weſten ab.

§ 207. Della Porta, dem es bekannt war, daß die Magnetnadel an verſchiedenen Orten verſchiedene Ablenkung zeigt, hatte im Jahre 1589 vorgeſchlagen, mit einer 10 Fuß langen Kompaßnadel über den Atlantiſchen Ozean zu fahren und fortwährend die Stellung derſelben zu beobachten. Man würde dann eine Tabelle über die Abweichung oder Mißweiſung während der ganzen Fahrt erhalten. Später könnten dann die Seefahrer dieſe Tabelle benutzen und durch Ableſen der Größe der Mißweiſung die geographiſche Länge beſtimmen. Gilbert machte darauf aufmerkſam, daß der Vorſchlag keine praktiſche Bedeutung haben könne, denn die Tabelle galt nur, wenn das Schiff bei der Überfahrt genau denſelben Breitengrad einhielt

Digitized by Google

wie das Schiff, welches die lange Magnetnadel mitgenommen hatte. Die Mißweisung kann nämlich an verschiedenen Stellen desselben Längengrades sehr verschieden sein, und die Mißweisung ändert sich in nördlichen Breitengraden viel schneller als in südlichen. — Heute kennen wir die Verhältnisse der Deklination und Inklination für die ganze Erdoberfläche viel genauer als zur Zeit Gilberts. Diese Kenntnis hat jedoch gar keine Bedeutung für die Ortsbestimmung, d. h. für die Ermittelung der Länge und Breite des Ortes, an welchem sich das Schiff befindet. Wenn dagegen die Länge und Breite dieses Ortes bekannt ist, so bildet die Deklination ein ausgezeichnetes Mittel, um den Kurs des Schiffes zu bestimmen.

§ 208. Zur Zeit Gilberts nahm die Kopernikanische Auffassung des Weltgebäudes die allgemeine Aufmerksamkeit in Anspruch. Jeder, der sich mit Naturwissenschaften beschäftigte, mußte Stellung zu dieser wichtigen Frage nehmen. Gilbert war, wie man sich denken kann, ebenso wie Galilei Anhänger des Kopernikus. Galilei wurde durch die Lektüre von Gilberts Buch zu Untersuchungen über den Magnetismus angeregt. So fragte er sich, ob sich nicht ein „freier" Magnet um seine eigene Achse drehen würde. In diesem Falle würde sich die Achsendrehung der Erde durch den Umstand erklären lassen, daß die Erde ein großer Magnet ist. Diese Meinung war zu Gilberts Zeit allgemein verbreitet, allein er selbst kam durch seine Untersuchungen zu dem Resultate, daß die Rotation nicht durch den Erdmagnetismus hervorgerufen wird.

§ 209. Man hatte früher beobachtet, daß vertikal stehende Eisenstangen magnetisch werden, und zwar so, daß unten ein Nordpol und oben ein Südpol entsteht. Gilbert überzeugte sich durch Annäherung einer leichten Magnetnadel, daß die Eisenstange wirklich Magnetpole besaß. Unten wurde der Südpol und oben der Nordpol der Nadel angezogen.

In welcher Weise entsteht nun der Magnetismus in der vertikalen Stange? Gilbert beantwortet diese Frage in folgender Weise: Hält man einen Eisenstab in die Nähe des Südpols eines Magneten, so wird der Stab selbst zu einem Magneten, und zwar entsteht der Nordpol an dem dem Südpol zugewendeten Ende, der Südpol am anderen Ende des Stabes. Ist also S (Fig. 167) ein Südpol, so entsteht in dem Eisenstabe bei A der Nordpol und bei B der Südpol. — Hätte man dagegen den Eisenstab AB mit dem Ende A einem Nordpol genähert, so wäre bei A ein Südpol und bei B ein Nordpol entstanden. — Ebenso wie ein Magnet wirkt aber die Erdkugel, die ja nach Gilbert ein großer Magnet ist, dessen Pole mit den geographischen Erdpolen zusammenfallen. Ein vertikaler Stab (der also annähernd die Richtung der Inklinationsnadel hat) muß daher durch die Wirkung des Erdmagnetismus magnetisch werden, und da am unteren Ende des Stabes ein Nordpol entsteht, so muß von den beiden magnetischen Polen

Fig. 167.

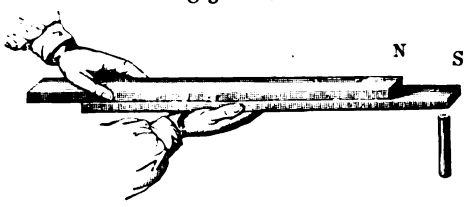
Eisen wird in der Nähe eines Magneten selbst magnetisch.

Digitized by Google

der Erde derjenige, welcher im Norden liegt, ein Südpol, und derjenige, welcher im Süden liegt, ein Nordpol sein. Dies steht auch damit in Einklang, daß eine frei schwebende Magnetnadel mit dem Nordpol nach Norden und mit dem Südpol nach Süden deutet, denn gleichnamige Pole stoßen sich ab und ungleichnamige Pole ziehen sich an (§ 197).

§ 210. In der magnetisierenden Kraft der Erde hatte **Gilbert** eine Bestätigung seiner Ansicht, daß die Erde ein großer Magnet ist, aber merkwürdigerweise spricht er sich über die Magnetisierung des Eisens durch Annäherung eines Magnetpols nicht näher aus, obgleich die Anziehung zwischen einem Magneten und unmagnetischem Eisen durch dieses Verhalten seine Erklärung findet. Zwischen dem Eisenstab AB und dem Magnetpol S (Fig. 167) findet Anziehung statt, weil sich ungleichnamige Pole gegenseitig anziehen. Der Pol B in dem Stabe AB kann nun wieder ein Stück Eisen magnetisieren und also anziehen. Wenn **Platon** schrieb (§ 191), ein Magnet könne seine Kraft in einen Eisenring legen, so bedeutet dies, daß der Eisenring selbst zum Magneten wird und auf seine Umgebung als solcher wirkt.

Fig. 168.



Der eine Pol hebt die Wirkung des anderen auf.

Zwei ungleichnamige Magnetpole magnetisieren ein und dasselbe Stück Eisen in entgegengesetzter Weise. Ein Südpol S (Fig. 168) zieht das kleine Eisenstäbchen an, indem dieses oben einen Nordpol und unten einen Südpol bekommt. Wenn aber dem Südpol S der Nordpol N genähert wird, so fällt das Eisenstäbchen ab, da N einen Südpol erzeugt, wo S einen Nordpol erzeugte. Das Eisenstäbchen wird sozusagen zugleich angezogen und abgestoßen und es fällt (wenn N und S gleich stark wirken) infolge seines Gewichtes.

§ 211. Man kann den Vorgang auch etwas anders aussprechen. Wenn das eine Ende eines Eisenstabes zugleich ein Nordpol und ein Südpol ist, so ist dieses Ende selbstverständlich „unmagnetisch".

Ein Nordpol übt nämlich sowohl auf Eisen, als auch auf einen anderen Magnetpol, die entgegengesetzte Wirkung aus wie ein Südpol. Die Anziehung des Nordpols wird stets von der Abstoßung des Südpols begleitet sein, und umgekehrt. Der **Nordmagnetismus** wird vom **Südmagnetismus** aufgehoben. Jeder von ihnen ist für sich allein wirksam, aber wenn sie beide zugleich in gleichen „Mengen" wirken, so heben sie sich gegenseitig auf, sie neutralisieren einander. — Diese Ausdrucksweise bringt es natürlich mit sich, daß man sich den Magnetismus als etwas Stoffliches vorstellt, und von je her hat man davon gesprochen, daß die magnetische Kraft durch „etwas" erzeugt werde, was vom Magneten ausströme. Allein die Vorstellung von diesem „etwas", was vom Magneten ausströmt, war eine sehr unbestimmte. Seit Newtons Zeit (I, § 289) wurde man etwas vertrauter mit dem

Digitized by Google

Gedanken, daß Kräfte in die Ferne wirken können, ohne daß eine Überführung von Stoff stattfindet, und die Vorstellung von dem Ausströmen des „Magnetstoffes" verschwand. Dagegen erhielt sich die Vorstellung, daß ein „Magnetstoff", ein magnetisches Fluidum, existiert.

§ 212. Eine eingehendere Bearbeitung erfuhr diese Theorie in der Mitte des 18. Jahrhunderts unter dem Einfluß von Franklins Theorie der Elektrizität durch Franz Aepinus (1724 bis 1809).

Aepinus, der in Rostock geboren war, wirkte als Professor in Berlin und später in Petersburg. Seine Arbeiten betreffen hauptsächlich die Elektrizität, aber hiermit im Zusammenhang auch den Magnetismus. Seine Theorie ist kurz die folgende. Alle Körper enthalten ein magnetisches Fluidum (eine Art Magnetstoff), und im „natürlichen" Zustande, in welchem sich keine magnetische Anziehung oder Abstoßung bemerklich macht, enthalten die Körper das Fluidum in relativ gleicher Menge. Das Fluidum kann aber im Eisen in einem einzelnen Teile des Körpers aufgehäuft werden, während ein anderer Teil ganz oder teilweise davon entleert wird. In diesem Zustande ist das Eisen ein Magnet. Der Nordpol ist diejenige Stelle, wo das magnetische Fluidum aufgehäuft ist, der Südpol diejenige Stelle, wo das Fluidum ganz oder teilweise entfernt ist. Zwei Nordpole stoßen einander ab, d. h. es findet zwischen den Teilen des elektrischen Fluidums Abstoßung statt. Ein Nordpol zieht einen Südpol an, d. h. der „natürliche" Zustand sucht sich wieder herzustellen. Bis dahin kann man die Erklärungen gelten lassen. Aber es war schwer zu erklären, warum ein Südpol einen Südpol abstößt. Aepinus erkannte selbst diese Schwierigkeit, und er mußte sich damit begnügen zu sagen, daß sich die Teilchen der Körper abstoßen, wenn sie weniger von dem magnetischen Fluidum enthalten als im „natürlichen" Zustande. Dies ist offenbar eine sehr künstliche Erklärung. In Wirklichkeit ist die ganze Aepinussche Theorie weiter nichts als ein Hilfsmittel, die magnetischen Erscheinungen zu fixieren. Aber auch in dieser Hinsicht hatte sie ihre Bedeutung. Mit einer Theorie sind immer gewisse Vorstellungen verbunden. Daß das Eisen bloß durch Annäherung eines Magneten magnetisiert wird, bedeutet nach der Aepinusschen Theorie, daß das magnetische Fluidum im Eisen verteilt wird. Man spricht demgemäß von einer Magnetisierung durch Verteilung.

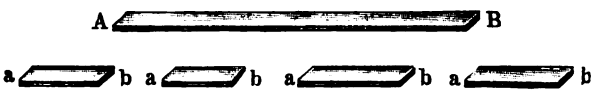
§ 213. Die Aepinussche Theorie, welche nur ein Fluidum annimmt, wurde später durch eine andere Theorie verdrängt, welche zwei Fluida annimmt. Robert Symmer (gest. 1763) führte nämlich zwei elektrische Fluida ein, und in Übereinstimmung hiermit nahm man auch zwei magnetische Fluida an, wodurch eine weniger künstliche Erklärung der Abstoßung zwischen zwei Südpolen ermöglicht wurde. Nun war die Abstoßung zwischen zwei Südpolen ebenso leicht zu erklären wie nach Aepinus die Abstoßung zwischen zwei Nordpolen. Der Südmagnetismus stößt nämlich den Südmagnetismus ebenso ab wie der Nordmagnetismus den Nordmagnetismus, während sich Südmagnetismus und Nordmagnetismus gegenseitig anziehen.

Digitized by Google

Im „natürlichen“ Zustande enthält das Eisen die beiden Arten des Magnetismus in gleichen Mengen und überall gleichmäßig verteilt. Das Eisen ist daher unmagnetisch, denn die beiden entgegengesetzten Magnetismen heben in ihren Wirkungen einander auf. Wenn aber dem Eisen ein Magnetpol genähert wird, so werden der Nordmagnetismus und der Südmagnetismus voneinander geschieden und das Eisen wird zu einem Magneten, und zwar so, daß dem angenäherten Pol gegenüber ein entgegengesetzter Pol entsteht (s. Fig. 167).

§ 214. Gilbert hatte inzwischen gefunden, daß, wenn man einen Magneten in zwei oder mehr Stücke zerbricht, jeder Teil einen kleinen Magneten bildet, der ebenso wie der große Magnet seine beiden Pole hat. Wird z. B. der Magnet AB (Fig. 169) in vier Stücke zerbrochen, so erhält man

Fig. 169.



Ein Magnet in kleine Magnete zerteilt.

vier kleine Magneten ab, und wenn A der Nordpol und B der Südpol ist, so werden a, a, a, a Nordpole und b, b, b, b Südpole. Dasselbe ist immer der Fall, so groß auch die Anzahl der Stücke ist, in die man einen Magneten zerbricht. Man muß daher schließen, daß jeder auch noch so kleine Teil eines Magneten ein selbständiger Magnet mit zwei Polen ist.

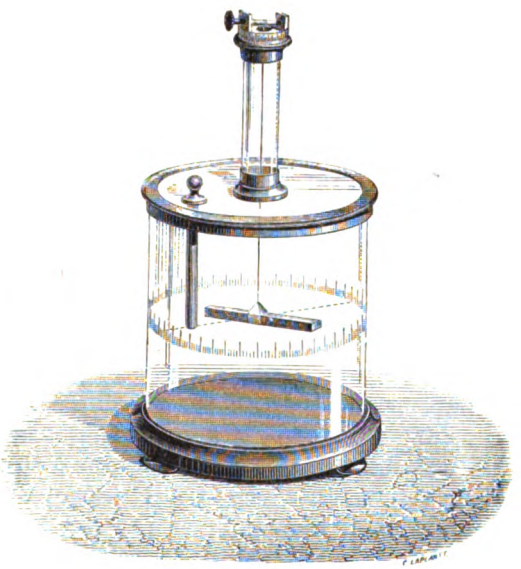
§ 215. Diese Betrachtung wurde von Charles Augustin Coulomb durchgeführt, dem wir eine Reihe von grundlegenden Arbeiten über Elektrizität und Magnetismus verdanken. Coulomb war 1736 in Angoulême geboren. Er wurde Genieoffizier und kam als solcher nach den westindischen Inseln. Nach neun Jahren kehrte er nach Frankreich zurück, wurde als Offizier in Rochefort angestellt, beschäftigte sich aber vorzugsweise mit wissenschaftlichen Arbeiten. Im Jahre 1779 gewann er einen Preis der Akademie für eine Abhandlung über den Schiffskompaß, 1781 wurde er Mitglied der Akademie und 1785 erfand er seine Drehwage, mit welcher er sehr schwache Kräfte, wie elektrische und magnetische Anziehungen und Abstoßungen genau messen konnte. — Als die Revolution ausbrach, verließ er Paris und ließ sich auf dem Lande nieder, um sich ungestört seinen Studien widmen zu können. Erst im dritten Jahre der Republik kehrte er zurück. Er starb 1806, hochgeachtet als Mensch und als Gelehrter.

§ 216. Der Name Coulombs ist am meisten durch die von ihm konstruierte Drehwage bekannt geworden, die er bei seinen Untersuchungen über die Torsion von Metalldrähten benutzte. Am unteren Ende des zu untersuchenden Drahtes wurde ein Stäbchen in horizontaler Lage aufgehängt. Wenn der Draht nicht gedrillt war, so befand sich das Stäbchen in einer bestimmten Lage, der Gleichgewichtslage. Wurde nun das Stäbchen gedreht,

Digitized by Google

so erlitt der Draht eine Torsion und leistete Widerstand, und wurde das Stäbchen losgelassen, so kam es in Schwingung. Aus dem Gewicht und der Form des Stäbchens, sowie aus der Geschwindigkeit der Schwingungen ließ sich dann die Größe des Torsionswiderstandes berechnen. Das Ergebnis dieser Untersuchungen wandte dann Coulomb auf seine Versuche mit der Drehwage an, durch welche die Größe der magnetischen Anziehung und Abstoßung gemessen wurde. Der Draht ist in einem Glasrohre aufgehängt und trägt an seinem unteren Ende eine Magnetnadel (Fig. 170), die in einem weiteren Glaszylinder schwebt. Die Magnetnadel sucht sich in den magnetischen Meridian einzustellen, und vermittelst der Aufhängevorrichtung, des sogenannten Torsionskopfes, kann man leicht dafür sorgen, daß der Draht nicht gedrillt ist, wenn sich die Magnetnadel in den Meridian eingestellt hat. Jetzt wird durch den Deckel des Glaszylinders ein Magnetstab geschoben, so daß sein Nordpol dem Nordpol der Nadel gegenübersteht. Die beiden Nordpole stoßen sich gegenseitig ab, und die Größe der Ablenkung kann auf einer auf der Zylinderfläche angebrachten Teilung abgelesen werden (s. Fig. 170). Die Nadel ist in der neuen Lage im Gleichgewicht, denn nach der einen Seite (zurück nach der Anfangsstellung) suchen die Torsion und der Erdmagnetismus zu drehen, nach der anderen Seite wirkt die Abstoßung der beiden Nordpole. — Die Wirkung des Erdmagnetismus auf die Nadel in der beobachteten Stellung wurde in folgender Weise gemessen. Der durch den Deckel herabgesenkte Magnet wurde entfernt, so daß sich die Nadel von neuem in den magnetischen Meridian stellte. Dann wurde die Nadel durch Drehung des Torsionskopfes wieder in die frühere Stellung gebracht. Jetzt war also Gleichgewicht zwischen dem Torsionswiderstande und der Drehungskraft des Erdmagnetismus vorhanden. Da nun der Torsionswiderstand des Drahtes aus früheren Versuchen bekannt war, so war die Drehungskraft des Erdmagnetismus gemessen. Die Größe der Abstoßung zwischen den beiden Nordpolen war dann gleich der Summe des Torsionswiderstandes und der gemessenen Drehungskraft des Erdmagnetismus. —

Fig. 170.



Coulombsche Drehwage.

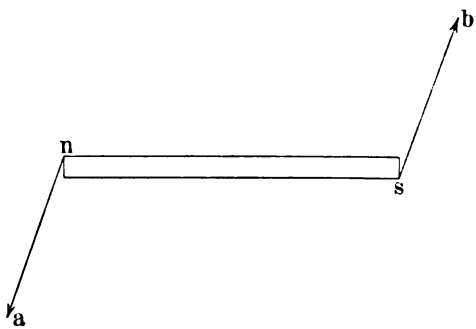
Digitized by Google

Coulomb brachte dann die Nadel durch Drehen des Torsionskopfes in neuen Stellungen ins Gleichgewicht. Auf diese Weise fand er, daß die Kraft, mit der sich die Pole abstoßen, mit dem Abstande derselben in der Weise abnimmt, daß die Abstoßung in der doppelten Entfernung ein viertel, und in der dreifachen Entfernung ein neuntel von der Abstoßung in der einfachen Entfernung ist. Dasselbe Gesetz befolgt die Anziehung zwischen einem Nordpol und einem Südpol. Für die Abnahme der magnetischen Kraft mit der Entfernung gilt also dasselbe Gesetz wie für die Abnahme der Helligkeit (I, § 83), der Wirkung der Wärmestrahlung, der Schwerkraft und, wie wir später sehen werden, der Wirkung der elektrischen Kräfte. Alle Fernewirkungen befolgen dasselbe Gesetz: Die Größe der Kraft nimmt in demselben Verhältnis ab, in welchem das Quadrat der Entfernung zunimmt.

Coulomb hat also durch seine Untersuchungen bewiesen, daß die magnetischen (und die elektrischen) Kräfte in einem gewissen Verwandtschaftsverhältnis zu den anderen Naturkräften (Licht, Wärme, Schwere) stehen.

§ 217. Coulomb sah nun auch den Grund ein, weshalb die Magnetnadel durch den Erdmagnetismus nicht fortbewegt, sondern nur gedreht wird.

Fig. 171.



Wirkung der Erde auf eine Magnetnadel.

Wenn nämlich die Erde wie ein Magnet wirkt, dessen Pole im Norden und im Süden tief unter der Oberfläche liegen, so muß eine Magnetnadel *n s* (Fig. 171) durch diese Pole die folgende Einwirkung erleiden. Der Nordpol *n* der Magnetnadel wird vom Nordmagnetismus der Erde mit einer Kraft abgestoßen, deren Richtung und Größe durch die Linie *n a* angegeben sein mag. Der Südpol *s* der Nadel dagegen wird vom Nordmagnetismus der Erde angezogen, und zwar mit derselben Kraft, mit der *n* abgestoßen wird, da die Entfernungen der Pole *n* und *s* von dem Punkte des Erdinnern, von welchem die Wirkung des Nordmagnetismus ausgeht, nicht merklich voneinander verschieden sind. Daher muß die Abstoßung in *n* ebenso groß sein wie die Anziehung in *s*. Die Anziehung und die Abstoßung haben aber entgegengesetzte Richtungen, da eine Linie von *n* nach dem Magnetpol der Erde und eine Linie von *s* nach dem Pol einander parallel sind. Zwei Kräfte von gleicher Größe und entgegengesetzter Richtung können aber nur eine Drehung, nicht eine Verschiebung der Nadel bewirken.

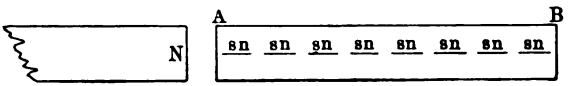
Genau dasselbe gilt für die südmagnetische Kraft der Erde, d. h. auch sie kann auf die Magnetnadel nur drehend wirken. Die Gesamtwirkung des Erdmagnetismus auf die Magnetnadel besteht also darin, daß sich diese

Digitized by Google

dreht, bis sie in eine bestimmte Lage, nämlich in den magnetischen Meridian kommt, der für verschiedene Orte verschieden ist (vergl. § 201).

§ 218. Nach der Auffassung Coulombs ist ein Magnet aus lauter kleinen Magneten zusammengesetzt. In jedem derselben sind also Nordmagnetismus und Südmagnetismus voneinander getrennt, in jedem kleinen Eisenteilchen sind die beiden Magnetpole vorhanden. In einem unmagnetischen Eisenstabe dagegen sind die beiden magnetischen Fluida in den Eisenteilchen vermischt. Wenn dem einen Ende eines weichen Eisenstabes AB (Fig. 172) der Nordpol N entgegengehalten wird, so werden der Nord-

Fig. 172.

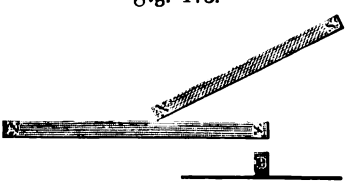


Beschaffenheit des Magneten nach Coulomb.

magnetismus und der Südmagnetismus in den Eisenteilchen voneinander geschieden. Diese werden zu Magneten, die ihre Nordpole dem Ende B und ihre Südpole dem Ende A zuwenden. Je stärker der Pol N ist, desto stärker sind auch die Pole der kleinen Magnete. Wenn der Pol N entfernt wird, so verschwindet auch der Magnetismus in AB, d. h. die beiden Magnetismen fließen in den Eisenteilchen zusammen. — Aus dieser Betrachtung folgt natürlich, daß jedes Eisenteilchen dieselbe Menge von dem nordmagnetischen und dem südmagnetischen Fluidum enthält.

§ 219. Es war lange vor Coulombs Zeit bekannt, daß sich Stahl der Wirkung eines Magnetpols gegenüber etwas anders verhält als weiches Eisen. Wenn der Stab AB, dem der Nordpol N genähert wird, aus Stahl besteht, so wird er nur sehr schwach magnetisch. Dies bedeutet nach Coulomb, daß in den Stahlteilchen der Nordmagnetismus und der Südmagnetismus schwer voneinander zu scheiden sind. Es ist in ihnen ein Widerstand gegen die Bewegung des magnetischen Fluidums vorhanden, der sich gewissermaßen als Reibungswiderstand geltend macht, wenn sich das Fluidum verteilen will. Coulomb bezeichnete die Kraft, mit der sich die Stahlteilchen der Bewegung des Fluidums widersetzen, mit dem Namen Koerzitivkraft.

Fig. 173.



Magnetisierung durch Streichen.

Wenn die Koerzitivkraft überwunden werden soll, so muß der Pol N stärker wirken. Dies läßt sich dadurch erreichen, daß man NS mit N' streicht (s. Fig. 173). Man setzt z. B. den Pol bei N auf und streicht bis S. Dann wird N' vom Magneten entfernt, von neuem bei N aufgesetzt, der Strich wiederholt u. s. w. Bei N entsteht dann ein Nordpol und bei S ein Südpol. Hätte man das

Digitized by Google

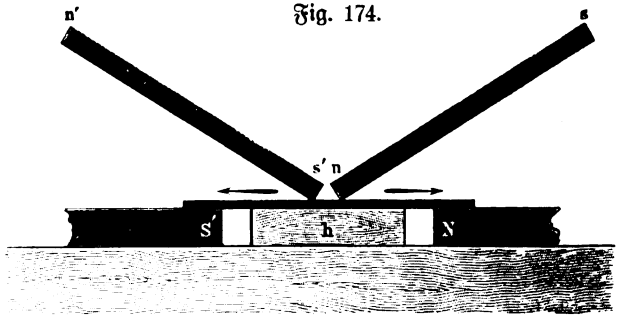
Streichen mit dem Südpol ausgeführt, so wäre bei N der Südpol und bei S der Nordpol entstanden. — Ein einzelner Strich bewirkt nur eine schwache Magnetisierung. Das Streichen muß mehrmals wiederholt werden, und die Magnetisierung wird durch mechanische Erschütterung des Stabes, z. B. durch Hammerschläge, befördert. Coulomb wußte anderseits auch, daß die Stärke des Magnetisierens, das sich durch Streichen erzielen läßt, seine Grenze hat. Die magnetische Kraft des streichenden Poles kann in dem Stahlstabe nur eine Polarität von bestimmter Stärke hervorrufen.

Wenn aber ein Stahlstab magnetisiert ist, so behält er im Gegensatz zu einem weichen Eisenstabe seinen Magnetismus bei. Ebenso wie sich die Koerzitivkraft der Trennung der Magnetismen in den Stahlteilchen widersetzt, ebenso verhindert sie auch das Zusammenfließen derselben, wenn sie getrennt sind. Ein magnetisierter Stahlstab heißt daher ein permanenter Magnet im Gegensatz zu einem magnetisierten weichen Eisenstabe, der aufhört, ein Magnet zu sein, sobald der verteilende Magnetpol (N in Fig. 172) entfernt wird.

Ein Stahlmagnet läßt sich jedoch auch wieder „entmagnetisieren", z. B. durch Hämmern oder durch abwechselndes Erhitzen und Abkühlen. Die Koerzitivkraft wird also geringer, wenn die Stahlmoleküle ihren Bewegungszustand ändern, einerlei ob diese Veränderung durch Hämmern, durch Drillen oder durch Wärme bewirkt wird (vergl. § 188).

§ 220. Zwei andere Methoden des Magnetisierens, bei denen vier Magnete verwendet werden, sind die von Duhamel und von Aepinus. Der zu magnetisierende Stab (Fig. 174) wird mit den Enden auf die beiden

Fig. 174.



Magnetisieren mit vier Magneten.

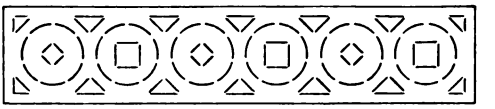
Pole S' und N zweier Magnete gelegt. Nach dem ersten Verfahren wird der Stab mit den entgegengesetzten Polen s' und n zweier Magnete von der Mitte aus gegen die Enden hin gestrichen. Nach dem zweiten Verfahren werden die beiden Pole s' und n nach derselben Seite hin, z. B. nach rechts, bewegt, von hier nach links zurückgeführt, dann wieder von links nach rechts bewegt, u. s. w. Nachdem diese Bewegung mehrmals wiederholt worden ist, werden die beiden Pole s' und n wieder in der Mitte des Stabes abgehoben.

Digitized by Google

§ 221. Die Annahme Coulombs, daß der Vorgang des Magnetisierens darin besteht, daß in den Eisenmolekülen eine Verteilung oder Scheidung zweier magnetischer Fluida, eines nordmagnetischen und eines südmagnetischen, stattfindet, ist heute durch eine Theorie verdrängt, die 1797 von dem irischen Chemiker Richard Kirwan (gest. 1812) aufgestellt und später von Ohm weiter ausgebildet wurde. — Kirwan nahm im Gegensatz zu Coulomb an, die Eisenmoleküle seien selbständige kleine Magnete mit einem Nordpol und einem Südpol, einerlei, ob das Eisen magnetisiert ist oder nicht.

Wenn das Eisen unmagnetisch ist, so liegen die Molekularmagnete so, daß Südpol und Nordpol zusammenstoßen und ihre Wirkungen gegenseitig aufheben. Die Molekularmagnete liegen in geschlossenen Linien (Fig. 175) und üben keine Wirkung nach außen hin aus, denn was einer von den Nordpolen anzieht, wird von einem der Südpole ebenso stark abgestoßen, und umgekehrt.

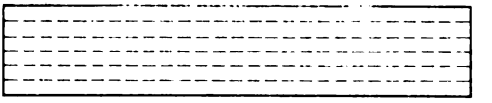
Fig. 175.



Molekularmagnete in geschlossenen Kurven.

Die Magnetisierung besteht nun darin, daß die geschlossenen Linien (Fig. 175) geöffnet und die Molekularmagnete gerichtet werden. Denkt man sich, daß alle Molekularmagnete gleichgerichtet werden, so würde die Magnetisierung vollkommen sein und der innere Bau des Magneten würde durch das in Fig. 176 gegebene Bild veranschaulicht werden. Die Molekularmagnete bilden gerade Linien, und magnetische Kraft, „freier Magnetismus" ist nur an den Enden des Stabes vorhanden. An dem einen Ende wirkt ausschließlich der Nordmagnetismus, an dem anderen nur der Südmagnetismus. Die Polstärke des ganzen Magneten hängt von der Stärke jedes einzelnen Molekularmagneten, sowie von der Anzahl der kleinen Pole ab, die den großen Pol bilden.

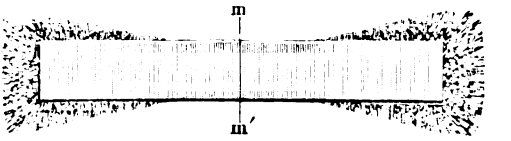
Fig. 176.



Vollständige Magnetisierung.

Bei wirklichen Magneten liegen jedoch die Verhältnisse nicht so einfach. Dies kann schon aus der Tatsache geschlossen werden, daß ein Magnet nicht nur an den Polen freien Magnetismus hat, sondern daß auch vom Nordpol bis zur Mitte freie nordmagnetische Kraft und ebenso vom Südpol bis zur Mitte südmagnetische Kraft vorhanden ist. Nur in der Mitte ist eine Stelle mm' (Fig. 177), wo der Nordmagnetismus und der Südmagnetismus im Gleichgewichte sind und also kein freier Magnetismus

Fig. 177.

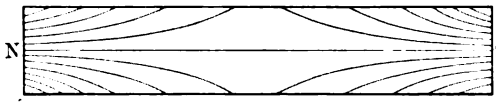


Ein in Eisenfeilspäne eingetauchter Magnet.

Digitized by Google

wirkt. Man kann dies deutlich beobachten, wenn man einen Magneten in Eisenfeilspäne eintaucht. An den Polen, wo die Magnetkraft am größten ist, bleiben diese in größter Menge an dem Magnetstabe hängen, aber in geringerer Menge auch zwischen den Polen und der Mitte des Magneten. Nur in der Mitte bleibt an dem Magneten nichts von dem Eisenpulver hängen. Die Molekularmagnete können daher nicht in geraden Linien in der Längsrichtung des Magneten angeordnet sein, sondern man muß sie sich in krummen Linien angeordnet denken (Fig. 178), die nicht sämtlich in den Endflächen, sondern zum Teil auch in den Seitenflächen des Magneten endigen.

Fig. 178.



Anordnung der Molekularmagnete.

§ 222. Die Koerzitivkraft bekommt nach Kirwan eine etwas andere Bedeutung. Sie ist nichts anderes als der Widerstand der Molekularmagnete gegen Drehung. In weichem Eisen, welches leicht magnetisiert wird, ist dieser Widerstand nur gering, aber die Molekularmagnete gehen, wenn die magnetisierende Kraft aufhört zu wirken, wieder in die ursprüngliche Lage zurück, und das Eisen ist wieder unmagnetisch. — In gehärtetem Eisen oder Stahl dagegen ist der Widerstand gegen Drehung groß, die Molekularmagnete sind nicht so leicht beweglich. Wenn aber der Drehungswiderstand überwunden ist, so beharren sie in ihren neuen Stellungen, d. h. der Stahlstab ist ein permanenter Magnet geworden.

§ 223. Daß die Vorstellung Coulombs von der magnetischen Verteilung durch die Drehungstheorie Kirwans verdrängt worden ist, hat seinen Grund darin, daß augenscheinlich eine molekulare Bewegung stattfindet, wenn Eisen magnetisiert oder entmagnetisiert wird. Wenn nämlich ein Eisenstab magnetisiert wird, so nimmt seine Länge etwas zu, und seine Dicke etwas ab. Dies deutet darauf hin, daß sich die Moleküle anders anordnen. Mit Hilfe eines elektrischen Stromes kann man, wie wir später sehen werden, eine weiche Eisenstange in kurzen Zwischenzeiten magnetisieren und entmagnetisieren. Der Stab wird dann abwechselnd länger und kürzer, er kommt, mit anderen Worten, in Schwingung und bringt ähnlich wie eine Stimmgabel einen Ton hervor. Die molekulare Bewegung macht sich auch dadurch bemerkbar, daß sich der Stab infolge der Reibung der Moleküle erwärmt.

§ 224. Einem Magneten, der eine möglichst große Tragkraft haben soll, gibt man die Form eines Hufeisens. Die ersten derartigen Magnete wurden vom Mechaniker Dietrich (gest. 1758) in Basel angefertigt.

Der Hufeisenmagnet (Fig. 179) wird so magnetisiert, daß seine Pole bei N und S liegen. Ein Stück weiches Eisen, welches an die Pole angelegt wird, der sogenannte Anker, wird von beiden Polen festgehalten. Der Nordpol N ruft im Anker einen Südpol s, und der Südpol S einen Nordpol n hervor. Indem aber N den Südpol s hervorruft, trägt N auch dazu bei,

Digitized by Google

daß der Nordpol n entsteht, und ebenso trägt S zur Bildung des Südpoles s bei. Jeder der beiden Pole N und S des Hufeisenmagneten zieht also nicht nur für sich allein den Anker an, sondern sie verstärken sich gegenseitig in ihrer Wirkung, wodurch die Anziehung eines jeden von ihnen verstärkt wird.

Der Anker verhindert, wie leicht einzusehen ist, daß der Hufeisenmagnet den Magnetismus verliert, d. h. er sucht die Richtung der Molekularmagnete zu erhalten. Daher läßt sich ein hufeisenförmiger Stahl stärker magnetisieren, wenn während des Magnetisierens der Anker vorgelegt wird. Ja der Anker kann selbständig den Magneten verstärken. Wenn man nämlich den Anker nach und nach immer etwas stärker belastet, so kann er schließlich (nach einigen Tagen) ein viel größeres Gewicht tragen als ursprünglich. Die Steigerung der Tragkraft wird dadurch bewirkt, daß die Molekularmagnete im Hufeisenmagneten und im Anker unter dem Einfluß der magnetischen Kräfte die günstigste Lage einnehmen.

Fig. 179.

Hufeisenmagnet.

Fig. 180.

Armierte Magnete.

Um Magnete vor Verlust des Magnetismus zu beschützen, versieht (armiert) man sie mit Ankern. Stabmagnete werden am zweckmäßigsten in der durch Fig. 180 veranschaulichten Weise armiert. NS und $N'S'$ sind die Magnetstäbe, ab und cd die Anker (Armaturen).

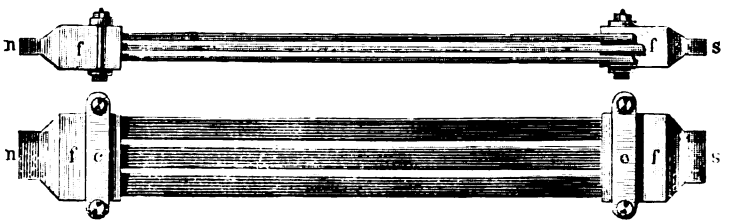
§. 225. Nach der Kirwanschen Drehungstheorie ist es leicht zu verstehen, daß ein Stahlstab nur bis zu einer gewissen Stärke magnetisiert werden kann. Wenn nämlich sämtliche Molekularmagnete in der vorteilhaftesten Weise angeordnet sind, ist eine weitere Magnetisierung nicht mehr möglich. Der Magnet ist dann, wie man zu sagen pflegt, mit Magnetismus gesättigt.

Ein dicker Stahlstab läßt sich nicht vollständig magnetisieren. Nur in den äußeren Schichten werden die Molekularmagnete gerichtet. Starke Magnete werden daher am zweckmäßigsten in der Weise hergestellt, daß man mehrere dünne magnetisierte Stahlstäbe zu einem großen Magnet, einem sogenannten „magnetischen Magazin“ (Fig. 181 a. f. S.) vereinigt. Die gleichnamigen Pole der einzelnen Magnetstäbe werden in ein Stück weiches Eisen (Anker) eingelassen. Es nützt jedoch nichts, die Zahl der Magnetstäbe über eine gewisse Grenze hinaus zu vermehren. Wenn nämlich mehrere Nordpole zusammenkommen, so wirkt jeder auf die anderen schwächend.

Digitized by Google

Aus diesem Grunde gibt man auch den einzelnen Stäben eines magnetischen Magazins verschiedene Länge (Fig. 181).

Fig. 181.



Magnetisches Magazin.

In ähnlicher Weise werden starke Hufeisenmagnete konstruiert. Die stärksten Magnete lassen sich durch Elektrizität erzeugen. Über diese wird später eingehender berichtet werden.

Der Erdmagnetismus.

§ 226. Im Jahre 1635 erschien in London ein Buch, welches bei den an der Seefahrt stark interessierten Engländern großes Aufsehen erregte. Der Verfasser des Buches war Henry Gellibrand (1597 bis 1637), Professor der Astronomie in London.

Gellibrand erklärte nämlich in seinem Buche, daß sich die Abweichung der Kompaßnadel von der Nordsüdlinie mit der Zeit ändere. Er hatte in seinem Garten eine Mittagslinie gezogen und mit Hilfe einer langen Magnetnadel die Größe der Abweichung ermittelt. Dabei hatte sich herausgestellt, daß sie jetzt kleiner war als früher.

Robert Norman hatte für die Größe der Abweichung 11° 15′ gefunden. Edmund Gunter, Gellibrands Vorgänger als Professor der Astronomie am Gresham College, hatte 1622 die Abweichung gemessen und 6° 12′ östlich gefunden, und Gellibrand fand 1634 für die Abweichung den Wert 4° 5′ östlich. Die Größe der Abweichung hatte also in der Zeit von 1576 bis 1634 ganz erheblich abgenommen.

In demselben Zeitraume hatten auch französische Physiker Veränderungen in der Stellung der Magnetnadel beobachtet und gefunden, daß in Paris die Abweichung in den Jahren 1580, 1603 und 1630 beziehungsweise $11\frac{1}{2}^{\circ}$, $8\frac{3}{4}^{\circ}$ und $4\frac{1}{2}^{\circ}$ östlich war. Die Franzosen hatten der Erscheinung jedoch keine große Bedeutung beigelegt. In England dagegen bildete das Erscheinen von Gellibrands Buch das Signal für umfassende und fortgesetzte Untersuchungen.

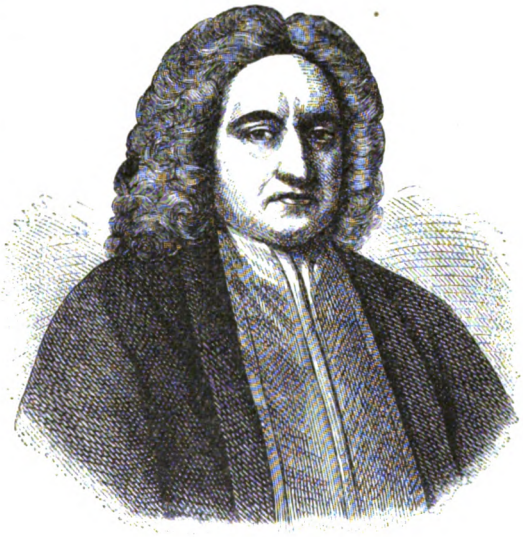
§ 227. Die meisten Arbeiten, welche im Laufe der nächsten Zeit auf dem Gebiete des Magnetismus erschienen, betreffen daher den magnetischen Zustand der Erde. In den Betrachtungen über den Magneten selbst und die

Digitized by Google

magnetiſche Kraft kam man nicht über den Standpunkt Gilberts hinaus. Die Accademia del Cimento wiederholte die Verſuche Gilberts, erzielte aber keine neuen Reſultate. Auch eine von Descartes (I, § 171) aufgeſtellte Theorie der magnetiſchen Kraft hat die Forſchung nicht gefördert. Wir wollen deshalb nicht näher auf dieſelbe eingehen, obwohl ſie an und für ſich genial und ſcharfſinnig war. Erſt als die Kenntniſſe auf dem Gebiete der Elektrizität eine Vertiefung erfahren hatten, machte ſich auch auf dem Gebiete des Magnetismus ein weiterer Fortſchritt bemerkbar.

Die erſte Darſtellung des magnetiſchen Zuſtandes eines größeren Teiles der Erdoberfläche verdankt man dem engliſchen Aſtronomen und Phyſiker Edmund Halley, einem der berühmteſten Zeitgenoſſen Newtons. Halley war 1656 in Haggerſton bei London geboren. Nachdem er die St. Paulsſchule in London beſucht hatte, kam er 1673 auf die Univerſität in Oxford. Sein Vater, ein reicher Seifenfabrikant, richtete ihm hier ein kleines phyſikaliſches Laboratorium ein und verſah ihn mit aſtronomiſchen Inſtrumenten, ſo daß er ſich ſchon früh mit ſelbſtändigen Arbeiten beſchäftigen konnte. Die erſte Arbeit, welche er veröffentlichte, war mathematiſcher Natur und betraf die geometriſche Beſtimmung der Exzentrizität der Planetenbahnen. Bald darauf faßte er den Entſchluß, einen Sternkatalog für den ſüdlichen Himmel anzufertigen. Mit Unterſtützung des Königs Karl II. begab er ſich nach St. Helena und beſtimmte hier die Orte von 340 Sternen. Zum Danke nannte er ein Sternbild „Eiche Karls II.“ zur Erinnerung an die hohle Eiche, in welcher ſich der König nach Worceſters Niederlage im Kampfe gegen Cromwells Truppen verborgen hatte.

Fig. 182.



Edmund Halley.

Nach ſeiner Rückkehr wurde er im Alter von 22 Jahren Mitglied der Royal Society. — Von ſeinen Beziehungen zu Newton iſt früher die Rede geweſen (I, § 297). Er wandte ſich jetzt dem Studium des Erdmagnetismus zu, ſammelte alle Nachrichten über die Abweichung (Deklination) der Magnetnadel, die er auffinden konnte, und veröffentlichte 1683 eine Tabelle, in der er das geſammelte Material zuſammengeſtellt hatte. In einer ſpäteren Abhandlung (1692) beſchäftigte er ſich mit der Urſache der Veränderung der

Digitized by Google

Deklination, die er aus Gellibrands Werk kannte und die auch aus dem von ihm gesammelten Material hervorging, welches sich über die Jahre 1640 bis 1680 erstreckte.

Weder die Verschiedenheit der Deklination an verschiedenen Orten, wie sie von Halley festgestellt worden war, noch auch die Veränderlichkeit der Deklination an einem und demselben Orte ließ sich durch die Annahme Gilberts erklären, daß die Erde ein großer Magnet mit einem Nordpol und einem Südpol sei.

Nach Halleys Tabelle war nämlich sowohl in Europa als auch an der Westküste Nordamerikas die Deklination westlich, aber an einer Stelle zwischen den beiden Weltteilen war sie entweder Null oder östlich. Dies war nach Halleys Ansicht mit Gilberts Theorie unvereinbar, und er nahm deshalb an, die Erde habe nicht zwei, sondern vier Magnetpole. Die Erde war also nach dieser Theorie eine Art Doppelmagnet mit zwei Nordpolen und zwei Südpolen. Um die Veränderlichkeit der Deklination zu erklären, stellte Halley ferner die folgende eigentümliche Theorie auf. Er nahm an, die Erde bestehe aus einer äußeren festen Schale und einem ebenfalls festen inneren Kern, der von der Schale durch eine flüssige Schicht getrennt ist, und sowohl die Schale als auch der Kern sei ein selbständiger Magnet mit zwei Polen. Ferner nahm er an, die Schale und der Kern drehten sich um eine gemeinsame Achse, aber der Kern etwas langsamer, so daß er in ungefähr 700 Jahren der Schale gegenüber um eine Umdrehung zurückblieb.

Unter dieser etwas kühnen Annahme muß allerdings eine Magnetnadel an einem und demselben Orte der Erdoberfläche im Laufe der Zeit ihre Richtung ändern. Diese wird durch alle vier Pole beeinflußt, und wenn sich also die Pole gegeneinander verschieben, so muß dies eine Änderung der Größe und Richtung der Gesamtwirkung zur Folge haben. Nach Verlauf von ungefähr 700 Jahren müssen sich die Veränderungen wiederholen, da sich dann die vier Pole wieder in der ursprünglichen Lage in bezug aufeinander befinden. Halley hatte sich in seine Ideen so hineingelebt, daß er es nicht für ausgeschlossen hielt, daß die Oberfläche des Erdkerns bewohnbar sei. Er glaubte, mit anderen Worten, an die Möglichkeit einer Unterwelt.

§ 228. Halley war durch seine ausgezeichneten Verbindungen mit der Regierung imstande, die Mittel für kostspielige Forschungen zu beschaffen. So unternahm er in den Jahren 1698 bis 1702 auf einem königlichen Schiffe drei Reisen in das Atlantische Meer, um an einer möglichst großen Anzahl von Orten die Richtung der Kompaßnadel zu bestimmen. Die Reisen erstreckten sich auf die Küsten von Afrika und Amerika, die Azoren, die Kanarischen Inseln und St. Helena. Nach den beiden ersten Reisen veröffentlichte er seine Beobachtungen in Form einer Deklinationskarte, d. h. einer Landkarte, auf welcher die Orte, welche gleiche Deklination hatten, durch eine Linie verbunden waren. Durch eine solche Karte finden die betreffenden Verhältnisse eine sehr übersichtliche Darstellung.

Während Halley das Material für eine Deklinationskarte sammelte,

Digitized by Google

wurde auch auf Seereisen von England nach China die Inklination gemessen, aber erst im Jahre 1768 wurde von J. C. Wilke (§ 51) eine Karte über diese Beobachtungen, eine Inklinationskarte, veröffentlicht.

Diese Art, den magnetischen Zustand der Erde darzustellen, hat man seit jener Zeit beibehalten, und die magnetischen Linien eignen sich vortrefflich zur Beobachtung der Veränderung, welche der Erdmagnetismus im Laufe der Zeit erleidet.

Der Name Halleys begegnet uns wiederholt in der Geschichte der Astronomie und Physik. Als er sich 1677 auf St. Helena aufhielt, beobachtete er einen Vorübergang des Merkur vor der Sonne, und bei dieser Gelegenheit kam er auf den Gedanken, den Vorübergang der Venus zur Bestimmung der Entfernung der Sonne zu benutzen. Im Jahre 1716 arbeitete er diesen Plan genauer aus, um die Astronomen zu veranlassen, gelegentlich des im Jahre 1761 eintretenden Venusdurchganges die Beobachtung auszuführen. Seine Anweisung wurde bei diesem Durchgange und auch bei späteren Durchgängen befolgt und sie hat zu einer sehr genauen Messung des Durchmessers der Erdbahn geführt (I, § 309). — Berühmt sind auch seine Berechnungen von Kometenbahnen, sowie seine Beobachtung der Bewegungen gewisser Fixsterne (I, § 322).

Halley wurde 1703 der Nachfolger von Wallis (I, § 178) als Professor der Mathematik an der Universität in Oxford und 1719 der Nachfolger Flamsteeds als königlicher Astronom an der Sternwarte zu Greenwich. In den Philosophical Transactions veröffentlichte er nicht weniger als 78 Abhandlungen. Er starb 1742.

§ 229. Unregelmäßigkeiten in der Richtung der Deklinationsnadel machen sich übrigens nicht nur in längeren Zeiträumen bemerklich. Die Nadel ist in Wirklichkeit so gut wie niemals in Ruhe, sondern sie verändert, wie George Graham entdeckt hat, ihre Richtung unaufhörlich.

Graham war 1675 in Horsgills in Cumberland geboren und kam als junger Mann bei dem berühmten Uhrmacher Tompion in die Lehre, der die ersten Taschenuhren mit Hookes Spiralfeder konstruierte (I, § 165). Tompion erkannte in dem jungen Graham alsbald ein hervorragendes mechanisches Talent.

Graham fertigte für die Sternwarte in Greenwich verschiedene Instrumente an, unter anderen auch den Sextanten, mit welchem Bradley die Aberration entdeckte (I, § 284). Besonders berühmt wurde er durch ein Planetarium, das er für Lord Orrery anfertigte, und das solchen Beifall fand, daß es in England bei reichen Leuten Mode wurde, in der Bibliothek ein solches Planetarium aufzustellen, obschon der Preis eines solchen ungefähr 20 000 Mk. war. Das Planetarium, welches den Lauf der Planeten um die Sonne und den Lauf der Monde um die Planeten zeigte, war übrigens nicht von Graham selbst erfunden, sondern von Peter Apian, dem berühmten Hofmathematiker Kaiser Karls V.

Graham war nicht nur praktischer Mechaniker, sondern er besaß auch

Digitized by Google

gründliche Kenntnisse in Astronomie und Physik und schrieb verschiedene wertvolle Abhandlungen über wissenschaftliche Instrumente und physikalische Erscheinungen. Die Königliche Gesellschaft der Wissenschaften nahm ihn 1728 als Mitglied auf. Er starb 1751 und wurde in der Westminsterabtei begraben, und zwar dem Wunsche seines Lehrmeisters und Gönners Tompion gemäß in demselben Grabe wie dieser.

§ 230. Bei seinen Beobachtungen über die Deklination, die er 1722 bis 1723 ausführte, benutzte er eine Nadel von 12 Zoll Länge, die sehr fein aufgehängt war und sich auf einem geteilten Kreise drehte, auf dem Bogen von zwei Minuten direkt abgelesen werden konnten. Er beobachtete, daß die Nadel von Stunde zu Stunde ihre Richtung änderte. Ja, die Nadel stand niemals ganz still, sondern sie machte ununterbrochen Schwingungen um die Gleichgewichtslage. Diese Änderungen um ungefähr $^1/_2{}^0$ kehrten jeden Tag regelmäßig wieder. Nach Grahams Beobachtungen ist die Abweichung abends zwischen 6 und 7 Uhr am kleinsten und mittags zwischen 12 und 4 Uhr am größten. Diese Zeitangaben sind jedoch nicht genau. Die Abweichung ist zwischen 7 und 8 Uhr morgens am kleinsten und nachmittags zwischen 1 und 2 Uhr am größten. Die Nadel geht also auf der nördlichen Halbkugel von 1 bis 2 Uhr nachmittags an nach Osten bis zum folgenden Morgen zwischen 7 und 8 Uhr, und dann nach Westen bis zwischen 1 und 2 Uhr nachmittags.

A. Celsius (§ 25), der mit Graham in Briefwechsel stand, veröffentlichte 1740 eine Reihe von Beobachtungen über die tägliche Bewegung der Deklinationsnadel. Durch diese Beobachtungen wurden die Stunden der größten und kleinsten Abweichung genauer ermittelt.

Celsius setzte seine magnetischen Beobachtungen fort, und es war sein Assistent Olaf Hjorter, der auf der Sternwarte zu Upsala 1741 beobachtete, daß die Magnetnadel jedesmal in starke Schwingung kam, wenn sich ein starkes Nordlicht zeigte. Es existiert demnach ein Zusammenhang zwischen dem Nordlicht und dem Erdmagnetismus, was bereits Halley 1716 vermutet hatte, da die Nordlichter, wie er beobachtet zu haben meinte, um ebensoviel von Norden abwichen wie die Magnetnadel.

§ 231. Halleys Theorie von den zwei festen und den zwei beweglichen Magnetpolen fand manche Anhänger, aber vielen anderen erschien diese Unterweltstheorie (§ 226) doch zu gewagt. Zu diesen gehörte auch der ausgezeichnete Mathematiker Leonhard Euler und der Göttinger Professor Tobias Mayer.

Euler war 1707 als Sohn eines Geistlichen in Basel geboren. Er studierte an der Universität seiner Vaterstadt, an der damals Joh. Bernoulli lehrte, Mathematik. Von 1727 bis 1741 war er in St. Petersburg als Mitglied der dortigen Akademie tätig, folgte dann einem Rufe Friedrichs II. nach Berlin, kehrte aber 1766 nach St. Petersburg zurück, wo er 1783 starb. Bereits 1735 erblindete er infolge einer Krankheit auf dem rechten Auge, und seit 1766 war er auch auf dem linken Auge fast blind. Trotzdem verfaßte er eine große Anzahl hervorragender mathematischer Arbeiten, durch die

Digitized by Google

hauptsächlich die von Newton und Leibniz begründete Differential- und Integralrechnung weiter ausgebildet wurde.

Euler war ein entschiedener Gegner von Newtons Lichttheorie, ebenso von Newtons Theorie, daß eine Kraft in die Ferne wirken kann, ohne daß ein zwischenliegendes Medium mitwirkt. Er suchte seine Ätherttheorie (siehe den Abschnitt über die Natur des Lichtes) auf die magnetischen Kräfte anzuwenden, gab dies aber schließlich auf und nahm ebenso wie Descartes an, daß von dem Magneten ein magnetisches Fluidum ausströmt. Was den Erdmagnetismus betrifft, so suchte er die Deklinationsverhältnisse mit Hilfe zweier Magnetpole zu erklären, die nicht diametral gegenüberliegen. Seine Berechnungen stimmten jedoch mit den beobachteten Abweichungen schlecht überein.

Tobias Mayer (1723 bis 1762), geboren in Marbach in Württemberg, seit 1751 Professor in Göttingen, war einer der tüchtigsten Astronomen des 18. Jahrhunderts. Für seine Mondtafeln, die zur Längenbestimmung dienten, erhielt seine Witwe von der englischen Regierung eine Belohnung von 3000 Pfund Sterling. Auch Mayer nahm nur zwei Magnetpole an, die in der Nähe des Erdmittelpunktes liegen. Nach seiner Ansicht wird nämlich der Erdmagnetismus durch einen im Vergleich zum Erdradius kurzen, aber außerordentlich starken Zentralmagneten hervorgerufen. Seine Voraussetzungen waren klar und bestimmt und konnten die Grundlage für Berechnungen bilden. Aus diesen ergab sich, daß der magnetische Äquator ein Kreis ist und daß die magnetische Kraft am größten an den magnetischen Polen der Erde, d. h. an denjenigen Stellen ist, wo eine durch die Pole des Zentralmagneten gehende Linie die Erdoberfläche trifft. Diese Folgerungen aus Mayers Annahmen finden aber keine genaue Bestätigung durch die Tatsachen. Der magnetische Äquator ist kein größter Kreis und die magnetische Kraft ist nicht an den Polen am größten.

§ 232. Während so die Theorie des Erdmagnetismus nicht mit den Messungen in Einklang zu bringen war, wurden diese — hauptsächlich aus praktischen Rücksichten — mit immer größerer Genauigkeit fortgesetzt, und es wurde durch die Beobachtungen der Seefahrer und Entdeckungsreisenden nach und nach ein überaus reiches Material gewonnen. Dieses konnte aber nur dann Bedeutung gewinnen, wenn es gesammelt und bearbeitet wurde. Diese große Arbeit wurde von Christoffer Hansteen ausgeführt.

Er war 1784 in Christiania geboren. Nachdem er das Gymnasium seiner Vaterstadt absolviert hatte, ging er 1802 nach Kopenhagen, um Jura zu studieren. Wahrscheinlich wählte er dieses Fach, um so bald wie möglich seine Mutter, die in dürftigen Verhältnissen lebte, unterstützen zu können. Er mußte indessen sein Studium unterbrechen und eine Hauslehrerstelle in Sorö annehmen. In dieser Stellung blieb er jedoch nur anderthalb Jahre.

Jetzt hielt er sich wieder eine zeitlang in Kopenhagen auf, wo er mit C. H. Oersted bekannt wurde. Dieser war 1804 von seiner ersten Reise ins Ausland zurückgekommen. Es regte sich damals überall in Europa auf

Digitized by Google

dem Gebiete der Physik und Oersted verstand es, die Begeisterung für die Wissenschaft, die ihn selbst beseelte, auf die studierende Jugend zu übertragen.

Hansteen hatte die Absicht, das juristische Studium zu vollenden, aber seine Mittel reichten nicht aus, und er übernahm daher 1806 die Stelle des Mathematiklehrers an der Lateinschule zu Frederiksborg.

Durch einen Zufall wurde er veranlaßt, sich mit magnetischen Untersuchungen zu beschäftigen. Die Schule erhielt nämlich als Geschenk ein Paar Globen, auf denen magnetische Kurven gezeichnet waren, und diese erregten in hohem Grade seine Aufmerksamkeit. Er machte sich mit allem, was man damals über den Erdmagnetismus wußte, genau bekannt, und fing an, selbständige Untersuchungen auszuführen. Die königliche Gesellschaft der Wissenschaften in Kopenhagen stellte 1811 die Preisaufgabe: „Lassen sich die Erscheinungen des Erdmagnetismus durch eine einzige magnetische Achse erklären oder müssen deren mehrere angenommen werden?" Hansteen reichte eine Beantwortung dieser Frage ein und erhielt den Preis.

§ 233. Er sollte also untersuchen, ob sich die magnetischen Erscheinungen mit Hilfe von Tobias Mayers Theorie erklären ließen, daß nämlich nur zwei Pole in der Nähe des Erdmittelpunktes vorhanden seien.

Hansteen richtete seine Bestrebungen sofort auf die Herstellung zuverlässiger magnetischer Karten. Man hatte damals nur einige sehr unvollkommene Deklinationskarten und noch schlechtere Inklinationskarten. Hansteen mußte sich die Angaben über die Stellung der Magnetnadel an den verschiedensten Orten der Erdoberfläche aus den Schiffsjournalen zusammensuchen und nach diesen Angaben die Karten entwerfen. Als seine Abhandlung 1819 gedruckt wurde, konnte er derselben einen ganzen Atlas beigeben, dessen Karten die Zeit von 1600 bis 1800 umfaßten.

Aus diesen Karten war leicht zu ersehen, daß der Erdmagnetismus nicht von einem einzigen Magneten mit zwei Polen herrühren kann. Dazu war der Verlauf der magnetischen Linien viel zu unregelmäßig. Hansteen verwarf daher die Annahme Mayers und versuchte die Erscheinungen ähnlich wie Halley durch die Annahme von vier Polen zu erklären, ohne jedoch die Halleysche Doppelerde dabei zu Hilfe zu nehmen.

§ 234. Hansteens Beantwortung der Preisaufgabe enthielt außer dem reichen Material über die Verhältnisse des Erdmagnetismus auch eingehende Untersuchungen über die Verteilung der magnetischen Kraft in einem Magneten und über die gegenseitige Einwirkung zweier Magneten aufeinander, und sie war die nächste Veranlassung, daß Hansteen 1813 zum Lektor an der neuen Universität in Christiania ernannt wurde. Er sollte seine neue Stellung erst im folgenden Jahre antreten und die Zwischenzeit zur Vorbereitung auf seine Lehrtätigkeit benutzen. Zu diesem Zwecke erhielt er, ebenso wie einige andere junge Gelehrte, die an die neue Universität berufen waren, eine königliche Unterstützung.

Die Eröffnung der Universität fand unter schwierigen Verhältnissen statt.

Digitized by Google

Seine Reise von Kopenhagen nach Christiania schildert Hansteen in folgender Weise:

„Als 1814 endlich die Zeit gekommen war, meine Stelle an der Universität anzutreten, war ich genötigt, einen ehemaligen Kaperlugger zu kaufen, sowie einen Kapitän und eine Anzahl norwegischer Matrosen zu engagieren, die sämtlich kurz zuvor aus englischer Gefangenschaft entlassen worden waren

Fig. 183.

Christoffer Hansteen.

und sehnsüchtig danach verlangten, wieder in die Heimat zu kommen. Nachdem nämlich die Norweger vom König der vereinigten Königreiche ihres Eides entbunden waren, hatten sie sich für unabhängig erklärt, und es war jedem Norweger in Dänemark bei Todesstrafe verboten, auf einem anderen Wege als durch Schweden nach Norwegen zu reisen. Hier wurde man aber aufgefordert, dem König von Schweden den Eid der Treue zu leisten, worauf man sich unter den damaligen Verhältnissen nicht einlassen konnte. Wenn man sich aber weigerte, so wurde man ins Gefängnis geworfen. Am 14. Juli reiste ich in diesem offenen Boot von Kopenhagen ab, begleitet von meiner

Digitized by Google

jungen Frau und meinem jüngeren Bruder. Nachts wurden wir lange Zeit von einem schwedischen Kaperschiff verfolgt. Als wir am dritten Morgen die norwegische Küste erreicht hatten, mußten wir uns, nachdem wir einigen Schüssen getrotzt hatten, dem englischen Kreuzerkapitän Mackenzie übergeben, der die von Dänemark genommene Fregatte „Venus" führte. Nachdem sich unser Kapitän und die Matrosen dem englischen Kapitän gegenüber legitimiert und ihn über meine Person und den Zweck meiner Reise aufgeklärt hatten, ließ uns dieser Ehrenmann laufen und wünschte uns glückliche Reise. Auch die Anwesenheit einer jungen Dame an Bord unseres Schiffes hat wohl

Fig. 184.

Die jetzige Sternwarte in Christiania.

dazu beigetragen, ihn zu überzeugen, daß unsere Expedition nicht kriegerischer Natur war." So erreichte Hansteen glücklich sein Vaterland, wo er einer der ersten von den hervorragenden Männern des „selbständigen" Norwegens wurde.

§ 235. Er sollte an der Universität unter anderem auch Astronomie vortragen und er mußte sich daher Gelegenheit schaffen, astronomische Beobachtungen anzustellen. Aber es fehlte für solche Beobachtungen sowohl an einem Gebäude als auch an den erforderlichen Instrumenten. Er borgte sich einen Sextanten und einen Chronometer. Anfangs mußte er seine Beobachtungen in einer zwei Treppen hoch gelegenen Wohnung im belebten Stadtteil machen, aber 1815 ließ ihm die Universität an der Südseite der Festung Akershus einen achteckigen hölzernen Schuppen erbauen. Auch einige gebrauchte Instrumente wurden angeschafft. In diesem ersten norwegischen Observatorium bestimmte Hansteen die geographische Lage Christianias.

Digitized by Google

Neben seiner Lehrtätigkeit und seinen astronomischen Arbeiten setzte er seine Beschäftigung mit dem Erdmagnetismus fort. Sein Werk über denselben erschien in deutscher Sprache und brachte ihn mit vielen ausländischen Gelehrten in Verbindung. Ja er machte Christiania zum Mittelpunkt für die erdmagnetischen Untersuchungen, indem er aus allen Weltgegenden Mitteilungen über erdmagnetische Messungen und Beobachtungen erhielt.

Diese unermüdliche Arbeit sowie das Ansehen, welches Hansteen im Auslande gewann, hat wohl wesentlich dazu beigetragen, daß er es in verhältnismäßig kurzer Zeit erreichte, daß in Christiania sowohl ein astronomisches (1830) als auch ein erdmagnetisches (1835) Observatorium errichtet wurde. Im Jahre 1855 konnte er mit Stolz schreiben: „Ich glaube, daß von den Observatorien an den vier nordischen Universitäten gegenwärtig das unserige das am besten ausgestattete ist."

Bei derselben Gelegenheit sagt er, es treffe keineswegs immer zu, was man damals zu glauben geneigt war, daß es leichter sei, eine absolute Regierung zur Unterstützung von Kunst und Wissenschaft zu bewegen, als eine Volksvertretung, die zum Teil von Männern gebildet wird, die mit der Wissenschaft wenig vertraut sind. „Die norwegische Universität hat allen Grund, für die Liberalität, mit der sie in jeder Hinsicht ausgestattet worden ist, dankbar zu sein."

Das Storthing bewilligte auch die Mittel für eine Reise nach Sibirien, die Hansteen in den Jahren 1828 bis 1830 unternahm, um dort magnetische Messungen vorzunehmen.

Außer zahlreichen wissenschaftlichen Abhandlungen hat Hansteen auch populäre Bücher und Abhandlungen geschrieben, von denen namentlich seine Reiseerinnerungen hervorzuheben sind, die auch in das Französische und das Deutsche übersetzt worden sind. Er trat 1861 von seinem Amt zurück und starb 1873.

§ 236. Wir wollen uns jetzt mit dem magnetischen Zustande der Erde, sowie den Veränderungen desselben in den letzten Jahrhunderten, zum Teil mit Hilfe von Hansteens Karten, bekannt machen.

Gilbert konnte mit Hilfe einer Terrella einige Hauptzüge des magnetischen Zustandes der Erde angeben. Diese Hauptzüge waren die folgenden: Die Deklination ist an verschiedenen Orten verschieden; es gibt auf der Erdoberfläche Punkte, an denen die Magnetnadel nach Osten abweicht, Punkte, an denen sie genau nach Norden deutet, und Punkte, an denen sie nach Westen abweicht.

Auch die Inklination ist an verschiedenen Orten verschieden. Gilbert gab richtig an, daß von England aus die Inklination nach Norden hin zunimmt und nach Süden hin abnimmt. Er glaubte ferner, es gäbe zwei magnetische Pole, einen am geographischen Nordpol, wo der Nordpol der Magnetnadel nach unten deutet, und einen am geographischen Südpol, wo der magnetische Südpol nach unten deutet. In Übereinstimmung hiermit

Digitized by Google

glaubte er, daß die Magnetnadel am Äquator in horizontaler Lage schwebe, daß der magnetische Äquator mit dem geographischen zusammenfalle.

Gilberts Ansichten über die Inklination und die magnetischen Pole sind nicht richtig, was die geographischen Bestimmungen betrifft. Die Erde hat zwei magnetische Pole und einen magnetischen Äquator in dem Sinne, den Gilbert diesen Worten beilegte und der ihnen auch heute noch beigelegt wird. Aber die Lage der Pole und des Äquators ist eine andere, als Gilbert vermutete.

Der magnetische Zustand der Erde wird in ausgezeichneter Weise durch die „magnetischen" Linien veranschaulicht.

Eine Gruppe von solchen Linien erhält man, wenn man nach dem Vorgange Halleys diejenigen Punkte durch Linien verbindet, an denen die Kompaßnadel dieselbe Richtung hat, an denen also die Deklination oder die Abweichung von der Nordsüdlinie dieselbe Größe hat.

Diese Linien heißen isogonische Linien oder Isogonen. Die Karte Fig. 185 stellt die Deklinationsverhältnisse für das Jahr 1860 dar. Die Zahlen auf den Isogonen geben die Größe der Deklination an.

Auf den mit 0 bezeichneten Linien deutet die Magnetnadel genau nach Norden. Die eine von ihnen läuft von der Halbinsel Kola an St. Petersburg vorbei durch Rußland, schneidet das Kaspische Meer und geht in einem Bogen um Vorderindien herum nach Australien und weiter nach Süden. Die andere geht durch die Hudsonbai und die östlichen Vereinigten Staaten, an Westindien vorbei durch Brasilien weiter nach Süden. Von den übrigen Linien entsprechen die ausgezogenen westlicher, die punktierten östlicher Deklination.

§ 237. Es ist leicht einzusehen, daß alle Isogonen, welche Deklination sie auch angeben, durch die geographischen Pole der Erde gehen müssen. Auch an den geographischen Polen stellt sich natürlich die Magnetnadel ebenso wie an jedem anderen Ort der Erdoberfläche in eine bestimmte Richtung, allein diese Richtung kann nicht im Verhältnis zur Nordsüdlinie angegeben werden, weil alle geographischen Meridiane durch die Pole gehen. Man kann also an den Polen die Stellung der Magnetnadel z. B. ebensogut in bezug auf den Meridian von Paris als auf den Meridian von Manila angeben, denn im Pol schneiden sich diese Meridiane. Wenn man sich also vom Pol entfernt, so kann man seinen Weg so wählen, daß die Nadel jede beliebige Deklination bekommt, d. h. alle Isogonen gehen durch die geographischen Pole.

Es gibt aber außerdem auf der Erdoberfläche noch zwei andere Punkte, durch die alle Isogonen gehen, nämlich die beiden Punkte, in denen die Inklinationsnadel senkrecht steht, d. h. die magnetischen Pole. Auch in diesen Punkten kann man der Deklination jeden beliebigen Wert beilegen. In diesen Punkten wirkt nämlich der Erdmagnetismus nicht in horizontaler, sondern nur in vertikaler Richtung. Entfernt man sich aber vom magnetischen Pol, so kann man offenbar auf jeder beliebigen Isogone gehen.

Dies auffallende Verhalten der Isogonen — daß sie sowohl durch die magnetischen als auch durch die geographischen Pole gehen — hat jedoch

Digitized by Google

offenbar seinen Grund nicht in einer besonderen Eigentümlichkeit des Erdmagnetismus, sondern nur in der Art und Weise, die man zur Darstellung der Richtung der Magnetnadel gewählt hat. Hätte man zu diesem Zwecke diejenigen Linien gewählt, die für jeden Ort die Richtung der Magnetnadel

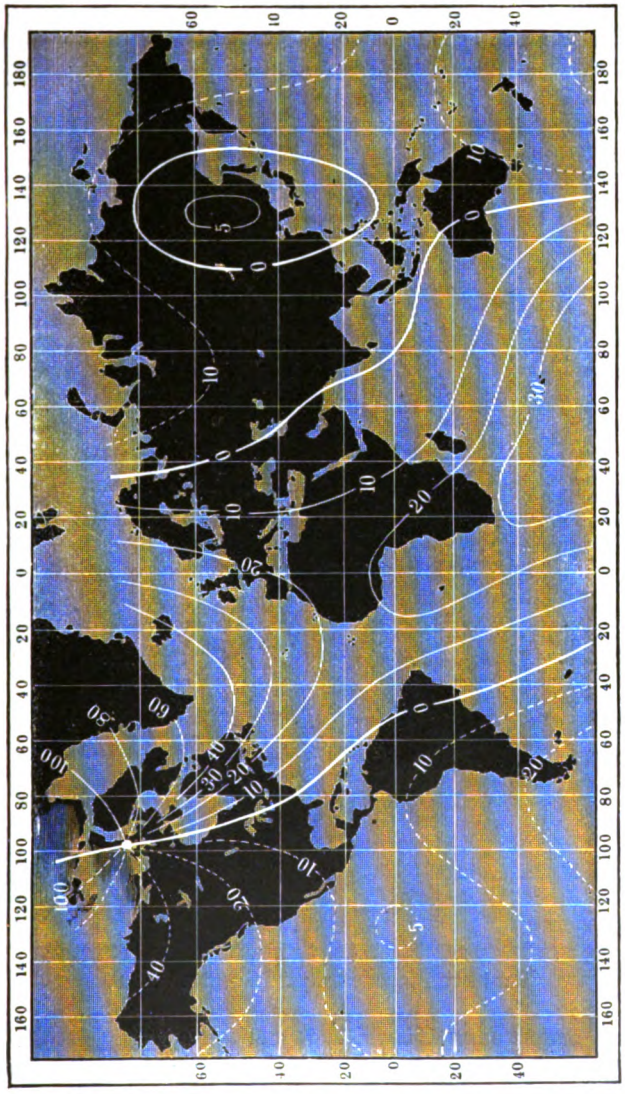


Fig. 185. Deklinationskarte für 1860.

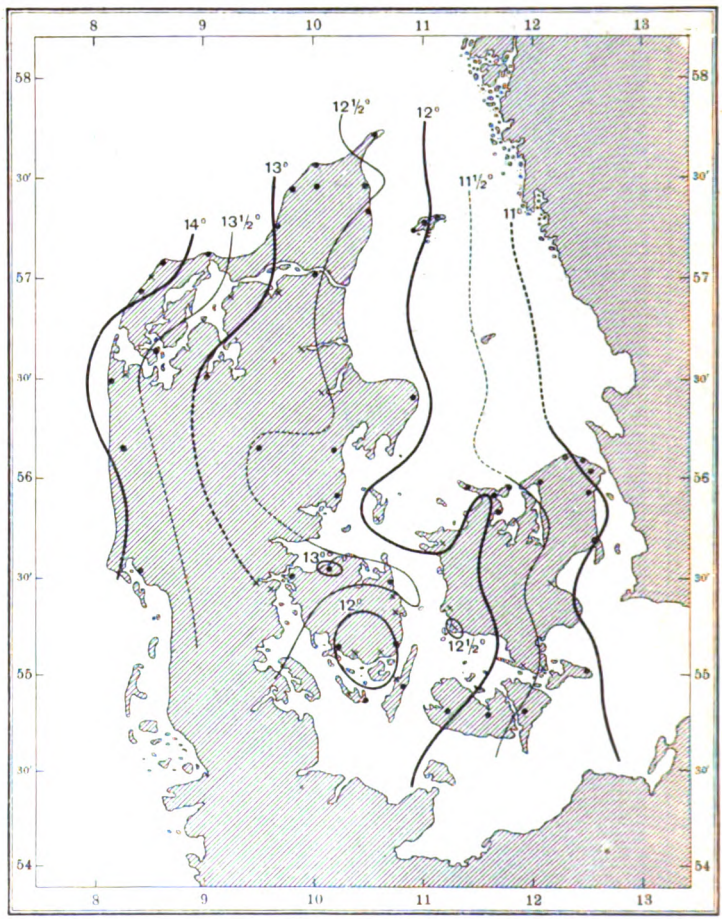
angeben, so hätten die geographischen Pole nicht die Auszeichnung bekommen die ihnen durch die Isogonen zuteil geworden ist. Durch den geographischen, Pol würde nur eine derartige Linie gehen.

Nur von einem dieser beiden magnetischen Pole ist die Lage durch

Digitized by Google

direkte Messungen ermittelt worden. Der magnetische Nordpol wurde 1831 von dem bekannten englischen Nordpolfahrer John Roß (1777 bis 1856) erreicht. Er liegt auf der von Roß entdeckten Halbinsel Boothia Felix im arktischen Amerika, unter 70° 30′ nördlicher Breite und 97° 40′ westlicher

Fig. 186.



Lauf der Isogonen über Dänemark (1891).

Länge. Den magnetischen Südpol hat man noch nicht erreicht, aber man hat seine Lage aus dem Verlaufe der magnetischen Linien berechnet und gefunden, daß er südlich von Tasmanien unter 73° 39′ südlicher Breite und 146° 15′ östlicher Länge liegt.

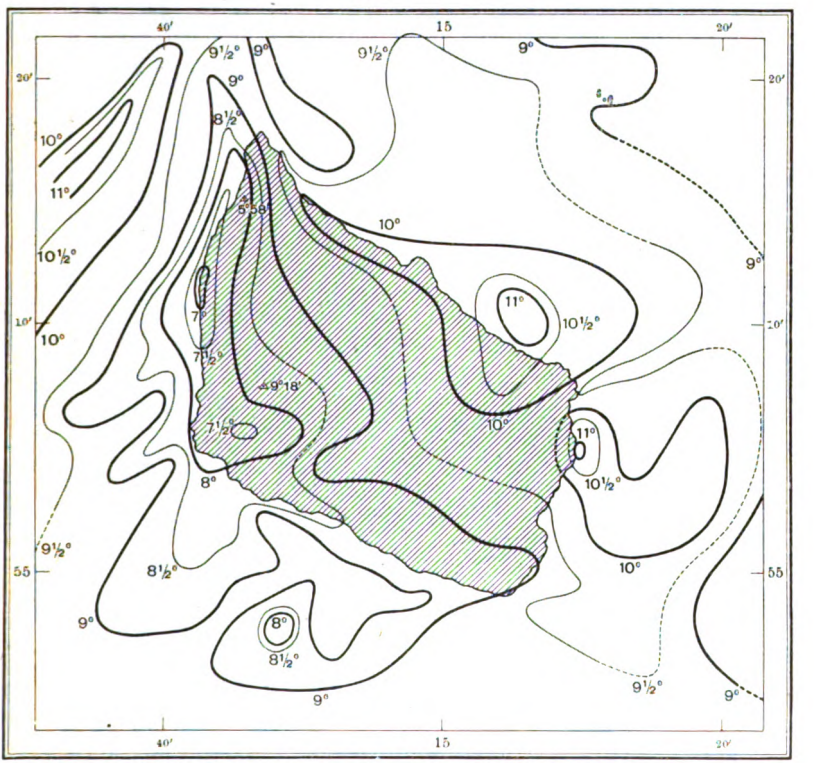
§ 238. Durch die Null-Isogonen wird die Erdoberfläche in zwei ungleiche Teile geteilt. Auf dem einen Teile, der den Atlantischen Ozean umfaßt, ist die Deklination westlich, auf dem anderen Teile, der Asien, den Großen

Digitized by Google

Ozean und den größten Teil von Amerika umfaßt, ist die Deklination östlich.

Wenn man von der altweltlichen Null-Isogone nördlich von Norwegen nach Westen reiste, so würde die westliche Deklination der Magnetnadel stetig zunehmen, d. h. man würde alle aufeinander folgenden Isogonen passieren. Ja, wenn man auf die andere Null-Isogone nördlich vom magnetischen Pol käme, so würde die Deklination 180° sein, mit anderen Worten, der Nordpol

Fig. 187.



Der Lauf der Isogonen auf und bei Bornholm (1891).

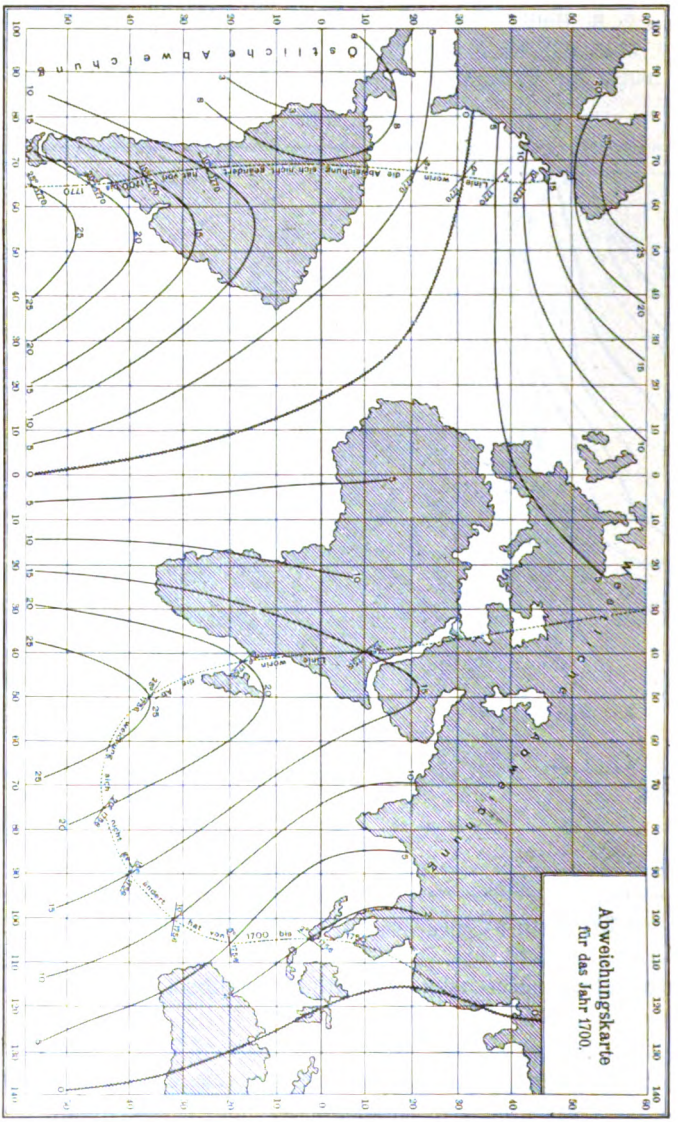
der Kompaßnadel würde vom magnetischen Nordpol in südlicher Richtung nach dem geographischen Pol deuten.

Reist man dagegen von Nordeuropa nach Newyork, so kommt man annähernd von der einen Null-Isogone bis zur anderen, die Deklination nimmt also nicht stetig zu. Sie nimmt ungefähr bis 30° westlich zu, nimmt aber dann, indem man sich der anderen Null-Isogone nähert, wieder ab. Ebenso liegen die Verhältnisse auf der südlichen Halbkugel, d. h. nach dem Pol hin sind die Änderungen der Deklination viel bedeutender als nach dem Äquator hin.

§ 239. Man darf übrigens nicht vergessen, daß die Karte Fig. 185

Digitized by Google

die Isogonen nur in ihren Hauptzügen darstellt. In Wirklichkeit laufen sie viel unregelmäßiger, wie Fig. 186 deutlich erkennen läßt. Die Karte ist von Adam Poulsen, dem Direktor des meteorologischen Instituts in Kopen-



Hansteens Deklinationskarte für 1700.

Fig. 188.

hagen, entworfen. Die Isogone von $12^1/_2{}^0$ (westl.) beginnt mit südöstlicher Richtung, geht dann in südlicher Richtung bis in die Nähe von Aarhus, beschreibt dann einen weiten Bogen nach Westen, läuft nördlich von Fünen nach dem Großen Belt, kehrt dann in scharfem Bogen um und läuft über

Digitized by Google

Fünen und den Kleinen Belt nach Alsen. Auch die Isogone von 12° hat einen stark gekrümmten Lauf, und im südlichen Fünen findet sich eine geschlossene Isogone von 12°.

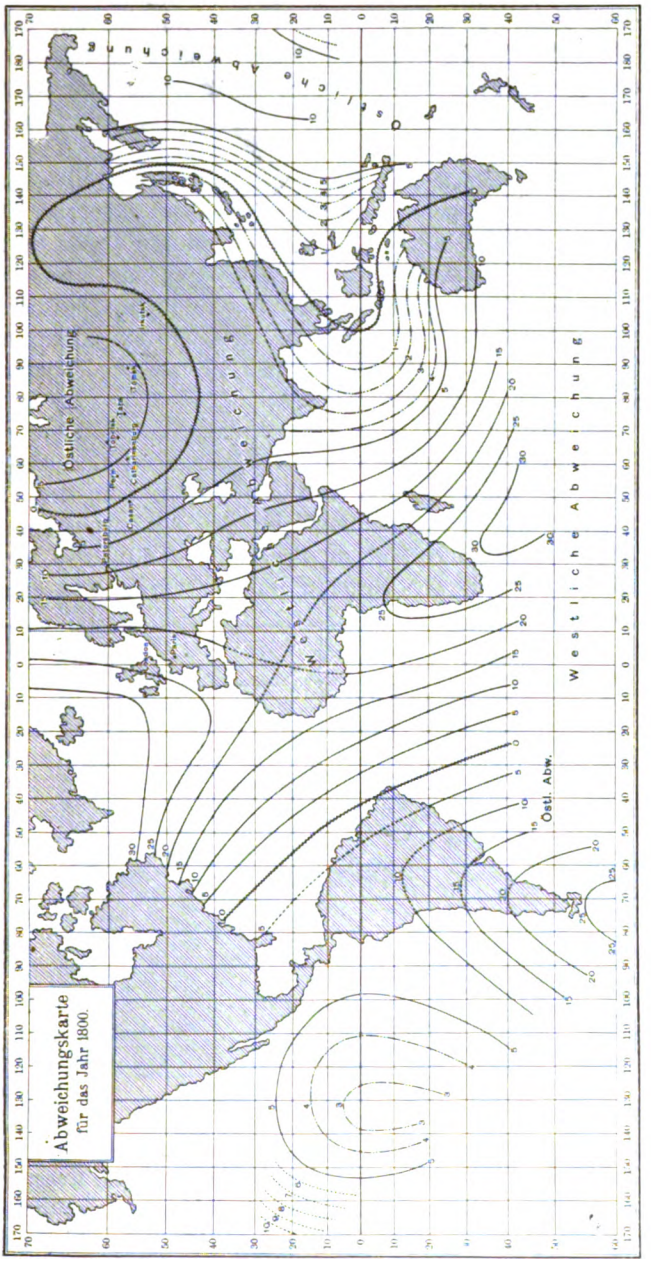


Fig. 189.

Hansteens Deklinationskarte für 1800.

Digitized by Google

Ein noch viel auffallenderes Beispiel von unregelmäßigem Verlauf der Isogonen bietet die Insel Bornholm nebst Umgebung (Fig. 187). Wenn die Deklination von Seeland bis Bornholm gleichmäßig abnähme, so müßte die Deklination an der Westküste der Insel $9^1/_2{}^0$ und an der Ostküste $9^1/_4{}^0$ westlich sein. Aber bei Hasle (an der Westküste) ist die Deklination nur 7^0 und in der Nähe von Svaneke über $10^1/_2{}^0$. Die Erscheinung wird durch den eisenhaltigen Granit, aus dem die Insel besteht, verursacht. Derselbe lenkt die Nadel nach dem Lande hin ab. Daher ist die Abweichung an der Westküste kleiner als an der Ostküste.

§ 240. Auf der Karte Fig. 185 findet man außer den beiden von Pol zu Pol gehenden Null-Isogonen noch eine geschlossene Linie ohne Deklination, die zum Teil im östlichen Asien, zum Teil im Großen Ozean liegt. Außerhalb der geschlossenen Linie ist die Deklination östlich und innerhalb derselben (bis zu 5^0) westlich. Die magnetischen Verhältnisse sind hier offenbar noch eigentümlicher als bei Bornholm oder der geschlossenen Isogone auf Fünen.

Aber weder die Null-Isogonen noch auch die anderen Isogonen sind feste Linien, wie schon Gellibrand nachgewiesen hat (§ 225). Die beiden Karten Fig. 188 und Fig. 189, die Hansteens magnetischem Atlas entnommen sind, geben den Lauf der Isogonen für 1700 und 1800 an. Vergleicht man sie mit der Karte für 1860 (Fig. 185), so erkennt man deutlich die Verschiebung, welche die Isogonen im Laufe der Zeit erfahren haben.

Wie sich in Kopenhagen und in London die Deklination im Laufe der Zeit geändert hat, ist aus der folgenden Zusammenstellung zu ersehen.

Kopenhagen		London	
Jahr	Deklination	Jahr	Deklination
—	—	1576	11° 15′ östlich
—	—	1634	4° 5′ „
1649	1° 30′ östlich	—	—
—	—	1657	0° 0′ „
1672	2° 30′ westl.	1672	2° 30′ westl.
1730	10° 37′ „	1720	13° 0′ „
1792	18° 23′ „	1790	23° 39′ „
1807	18° 26′ „	1800	24° 36′ „
1819	18° 6′ „	—	—
—	—	1831	24° 0′ „
1848	16° 23′ „	—	—
1878	12° 2′ „	1878	19° 4′ „
1883	11° 38′ „	—	—
1891	11° 1′ „	—	—

Um das Jahr 1660 ging also die Null-Isogone durch Kopenhagen. Vor dieser Zeit war die Deklination östlich, seit 1860 dagegen westlich, und zwar am größten um 1808. Seit dieser Zeit geht die Nadel wieder nach Osten

Digitized by Google

zurück. Man kann die Deklinationsnadel als eine Art Pendel betrachten welches außerordentlich langsame Schwingungen von Osten nach Westen und wieder zurück macht. Für Kopenhagen hat die Nadel ungefähr 148 Jahre

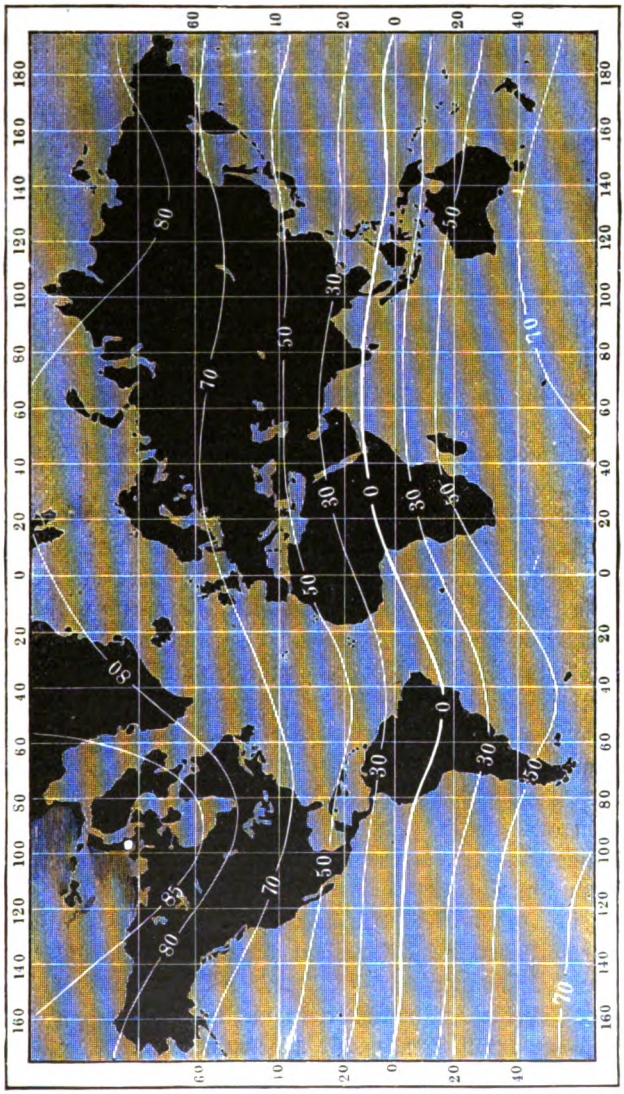


Fig. 190. Inklinationskarte für 1860.

gebraucht, um sich von Norden bis in die äußerste östliche Stellung zu bewegen. Die jährliche Änderung war aber zu verschiedenen Zeiten verschieden, augenblicklich ist sie in Kopenhagen 5′. Man kann daher nicht wissen, ob die Nadel zur Rückkehr in die Nordrichtung dieselbe Zeit brauchen wird. Aber

Digitized by Google

wahrscheinlich braucht die Nadel zur Ausführung einer vollen Schwingung ungefähr 600 Jahre.

§ 241. Um eine Übersicht über die Stellung der Inklinationsnadel an verschiedenen Orten der Erdoberfläche zu bekommen, hat man (nach dem Vorschlag von Wilkens, § 228) auf der Karte diejenigen Punkte verbunden, an denen die Inklination dieselbe ist. Man erhält so die sog. isoklinischen Linien oder Isoklinen. Sie verlaufen, wie aus Fig. 190 (a. v. S.) zu ersehen ist, viel regelmäßiger als die Isogonen, aber sie sind doch weit davon entfernt, Parallelkreise zu sein, wie Gilbert glaubte. Je mehr man sich den magnetischen Polen nähert, desto unregelmäßiger wird die Form der Isoklinen. Die in der Figur mit 0 bezeichnete Linie ist der magnetische Äquator, d. h. die Linie, auf welcher die Inklinationsnadel horizontal steht. Nördlich von dieser Linie deutet der Nordpol und südlich von derselben der Südpol der Nadel nach unten. Der magnetische Äquator liegt zum Teil nördlich und zum Teil südlich vom geographischen Äquator. Er schneidet diesen im Golf von Guinea, läuft dann nördlich vom Erdäquator bis ungefähr in die Mitte des Großen Ozeans, wo er wieder auf die Südseite des Erdäquators übergeht.

In Kopenhagen war die Inklination 1893 68° 50′, in Nordjütland $70\frac{1}{2}°$, in Südjütland $68\frac{1}{2}°$.

Ebenso wie die Deklination ändert sich auch die Inklination im Laufe der Zeit. Diese Änderungen vollziehen sich in einer Periode von ähnlicher Dauer wie die Änderungen der Deklination, sind aber bei weitem geringer als diese. Die Messung der Inklination bietet bedeutend größere Schwierigkeiten als die Messung der Deklination. Die Aufhängung und die Magnetisierung der Inklinationsnadel muß außerordentlich sorgfältig ausgeführt werden, wenn die Messungen auch nur einigermaßen richtig ausfallen sollen. Um den genauen Wert der Inklination zu bekommen, muß eine Anzahl von Bestimmungen ausgeführt werden, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann. Diese Schwierigkeiten lassen es erklärlich erscheinen, daß über die Inklination aus früheren Zeiten viel spärlichere Nachrichten vorliegen als über die Deklination. In London nahm die Inklination bis ungefähr 1720 zu. In diesem Jahre hatte sie den Wert 74° 42′. Seitdem hat sie stetig abgenommen; im Jahre 1879 war sie 67° 42′.

In Dänemark hat die Inklination abgenommen, solange man sichere Nachrichten hat; 1820 war sie 70° 37′ und 1892 nur noch 68° 50′ [1]). Seit dieser Zeit hat sich die Inklination nicht merklich geändert, so daß man annimmt, daß sie an einem Wendepunkt angekommen ist.

§ 242. Vor der Zeit Hansteens hatte man sich hauptsächlich nur für die Messung der Deklination interessiert, da diese von großer praktischer Be-

[1]) Da die Nordlichtstrahlen, wie wir sehen werden, an derjenigen Stelle des Himmels zusammenlaufen, nach welcher der Südpol der Inklinationsnadel deutet, hat man aus Aufzeichnungen Tycho Brahes berechnet, daß die Inklination auf Hveen im Jahre 1584 72° 25′ gewesen ist.

Digitized by Google

deutung ist. Hansteen sammelte aber nicht nur Material für Inklinationskarten, sondern er legte auch Wert darauf, die Stärke des Erdmagnetismus für verschiedene Orte zu bestimmen. Er erkannte, daß die Stärke oder Intensität des Erdmagnetismus ein ebenso wichtiges Element des magnetischen Zustandes der Erde bildet wie die Richtung der Magnetnadel. Hierauf hatte bereits Borda (I, § 280) aufmerksam gemacht, und einzelne Messungen waren in der letzten Hälfte des 18. Jahrhunderts ausgeführt worden, aber erst die Beobachtungen Alexander v. Humboldts, die er auf seinen Reisen in Amerika (1798 bis 1804) ausführte, brachten diese Frage in wissenschaftlichen Kreisen auf die Tagesordnung. Humboldt bestimmte die Stärke des Erdmagnetismus nach Bordas Anweisung mit Hilfe schwingender Magnetnadeln. Wie diese in mancher Hinsicht schwierigen Schwingungsversuche ausgeführt werden, kann hier nicht näher auseinandergesetzt werden. Aber es ist leicht einzusehen, daß man die magnetische Kraft der Erde ebensogut vermittelst der Schwingungen eines Magneten messen kann, wie die Anziehungskraft der Erde vermittelst der Schwingungen eines Pendels. Wenn Humboldt die gesamte erdmagnetische Kraft bestimmen wollte, ließ er die Inklinationsnadel im magnetischen Meridian schwingen. Wollte er dagegen, was bedeutend leichter ist, nur die horizontale Komponente der magnetischen Kraft bestimmen, so ließ er eine Deklinationsnadel schwingen und zählte die Schwingungen, die sie in einer bestimmten Zeit machte.

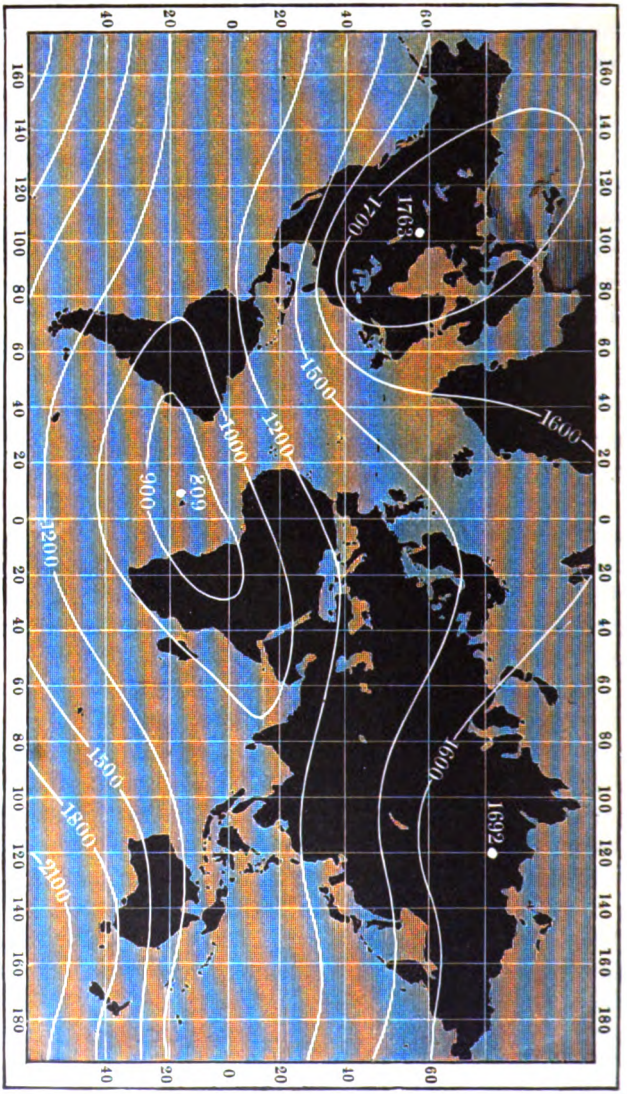
Er fand, daß in Peru die erdmagnetische Kraft am magnetischen Äquator am geringsten ist. Sowohl nach Norden als nach Süden hin nimmt sie zu. Er zog aus dieser Wahrnehmung den Schluß, daß die magnetische Kraft vom magnetischen Äquator bis zu den magnetischen Polen zunimmt und hier am größten ist. Er hat sich jedoch später selbst davon überzeugt, daß er sich geirrt hatte. Vor Humboldt war allgemein die Ansicht verbreitet, daß die erdmagnetische Kraft überall auf der Erde dieselbe sei. Humboldt erkannte, daß dies nicht der Fall ist, und die ersten Beobachtungen schienen auf einen einfachen Zusammenhang zwischen der Stärke des Erdmagnetismus und den Isoklinen hinzudeuten. Allein wenn man einem Naturgesetz auf die Spur kommt, so bedürfen, wie Humboldt selbst schreibt, die zuerst gebildeten Anschauungen in den meisten Fällen einer späteren Berichtigung.

Die erste einigermaßen ausführliche Karte über die Größe der erdmagnetischen Kraft an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche wurde 1826 von Hansteen veröffentlicht. Die Linien, welche diejenigen Orte verbinden, an denen die Intensität des Erdmagnetismus dieselbe Größe hat, heißen isodynamische Linien oder Isodynamen. Daß die Kraft des Erdmagnetismus, wie Humboldt angenommen hatte, vom magnetischen Äquator nach den Polen hin zunimmt, ist im allgemeinen richtig, aber sie erreicht ihre größte Stärke nicht in den Polen selbst.

Durch Fig. 191 (a. f. S.) wird der Verlauf der Isodynamen für das Jahr 1835 veranschaulicht. Auf der nördlichen Halbkugel findet sich in der Nähe des magnetischen Pols ein Punkt, in welchem die erdmagnetische Kraft

Digitized by Google

größer ist als in der Umgebung (der Punkt ist mit der Zahl 1763 bezeichnet). Ein zweiter Maximalpunkt auf der nördlichen Halbkugel liegt im nördlichen Asien (1692). In dem letzteren Punkte ist die Kraft etwas kleiner



Isodynamen für 1835. Fig. 191.

als in dem ersteren. Die Isodynamen laufen, wie man sieht, nicht regelmäßig, und es befinden sich auch unter ihnen geschlossene Kurven. Die Zahlen geben die Größe der magnetischen Kraft an der betreffenden Stelle in einer willkürlich gewählten Einheit an. Auf der südlichen Halbkugel liegt der Maximalpunkt in größerer Entfernung vom magnetischen Pol. Übrigens ist

Digitized by Google

die Bestimmung dieser Maximalpunkte noch sehr unsicher. Ein Maximalpunkt liegt zwischen Afrika und Südamerika. Er ist auf der Karte mit der Zahl 809 bezeichnet.

§ 243. Unter denen, die durch die Arbeiten Hansteens angeregt wurden, sich mit Untersuchungen über den Erdmagnetismus zu beschäftigen, ist in erster Linie der große Mathematiker und Astronom Karl Friedrich Gauß zu nennen. Er war 1777 in Braunschweig als Sohn unbemittelter Eltern geboren, besuchte das Gymnasium seiner Vaterstadt und bezog dann die Universität Göttingen. Schon als Student erregte er Aufsehen durch eine Abhandlung über die Konstruktion gewisser regelmäßiger Vielecke, z. B. des Siebzehnecks, und im Alter von 25 Jahren veröffentlichte er seine berühmte Berechnung der Bahn des Planeten Ceres (I, § 312). Diese Arbeit, welche heutzutage die Grundlage der theoretischen Astronomie bildet, erschien im Jahre 1809, also zweihundert Jahre nach dem Erscheinen von Keplers berühmter Astronomia nova, in erweiterter Form unter dem Titel „Theorie der Bewegung der Himmelskörper". Und ebenso wie Kepler in dem Vorwort zu seinem Werk sagen konnte, daß es dem vortrefflichen Heerführer Tycho gelungen sei, die Kriegslisten des Mars zu erforschen und ihm das Material für die Berechnung der Planetenbahnen zu liefern, so konnte Gauß schreiben, daß es ihm gelungen sei, die Kometenbahnen zu bemeistern: „Die Kometen, die lange Zeit ohne Regel und Gesetz umherzufahren schienen und die sich immer, wenn man sie besiegt zu haben glaubte, als Aufrührer und Rebellen erwiesen, haben sich endlich durch neue Siege, die durch das Newtonsche Anziehungsgesetz gewonnen wurden, zügeln lassen und sind jetzt nicht mehr Feinde, sondern freundliche Gäste."

Fig. 192.

Gauß und Weber.

Auf dem Gebiete der Mathematik hat Gauß in verschiedenen Richtungen neue Bahnen gebrochen. Hier soll nur die Erfindung der Methode der kleinsten Quadrate erwähnt werden, die eine ausgedehnte Anwendung in der Wahrscheinlichkeitsrechnung findet, z. B. wenn man aus einer Reihe von Versuchsresultaten, die notwendigerweise mit Beobachtungsfehlern behaftet sind, einen möglichst genauen Mittelwert ableiten will.

Gauß hatte wie Newton die Gewohnheit, seine Arbeiten oft lange liegen zu lassen, ohne sie zu veröffentlichen, so daß er die Ehre, wichtige

Digitized by Google

mathematische Probleme gelöst zu haben, nicht selten anderen überlassen mußte.

Nachdem Gauß sein Universitätsstudium beendet hatte, verlieh ihm der Herzog von Braunschweig, der ihn auch während seiner Studienzeit durch Verleihung von Stipendien unterstützt hatte, einen Jahresgehalt von 400 Talern, der auf 650 Taler erhöht wurde, nachdem Gauß eine Berufung als Direktor der Petersburger Sternwarte abgelehnt hatte. Seit 1807 war er Professor und Direktor der Sternwarte in Göttingen. Eine Berufung nach Berlin lehnte er ebenfalls ab. Er verließ ungern Göttingen, selbst wenn es sich nur um kleinere Reisen handelte. Doch ließ er sich dazu bewegen, im Jahre 1828 an der Naturforscherversammlung in Berlin teilzunehmen. Hier wurde er mit Wilhelm Eduard Weber bekannt, der damals Professor in Halle war. Die Freundschaft, welche die beiden Männer bei dieser Gelegenheit schlossen, führte dazu, daß Weber drei Jahre später nach Göttingen berufen wurde.

Weber stammte aus Wittenberg, wo sein Vater Professor der Theologie war. Bereits im Alter von 21 Jahren (1825) veröffentlichte er gemeinsam mit seinem Bruder Ernst Heinrich die „Wellenlehre auf Experimente gegründet". Wir werden später seinem Namen in der Elektrizitätslehre begegnen. Hier soll nur seiner Tätigkeit auf dem Gebiete des Magnetismus gedacht werden.

Gauß war mit Untersuchungen über den Erdmagnetismus beschäftigt, noch ehe Weber nach Göttingen übergesiedelt war, und er veranlaßte diesen, sich an den Arbeiten zu beteiligen. Vorher war Weber vorzugsweise auf dem Gebiete der Wellenlehre und der Lehre vom Schall tätig gewesen. Es unterliegt keinem Zweifel, daß Gauß bei seinen physikalisch-mathematischen Untersuchungen von Weber wertvolle Anregungen erhalten hat, und was die Arbeiten über den Erdmagnetismus betrifft, so ist bei diesen der Einfluß Alexander v. Humboldts ein sehr bedeutender gewesen.

§ 244. Alexander v. Humboldt war einer der hervorragensten derjenigen Gelehrten, die am Anfang des 19. Jahrhunderts einen mächtigen Anstoß zu neuer, allseitiger und gründlicher Forschung gegeben haben, deren Ideal eine Gesellschaft war, in der die wirklich Gebildeten die leitenden und tonangebenden Persönlichkeiten sein sollten. Alexander v. Humboldt und sein Bruder, der Sprachforscher und Staatsmann Wilhelm v. Humboldt, nahmen in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts im deutschen Geistesleben eine ähnliche Stellung ein wie die Gebrüder Örsted im dänischen. Jeder von ihnen war auf seinem Gebiete selbständig, aber er war auch auf anderen Gebieten nicht unbewandert. Sie hatten Sinn für alle Seiten des geistigen Lebens. Sie waren keine einseitigen Fachgelehrten, sondern Männer von universeller Bildung, für die es kein unbekanntes Gebiet des geistigen Lebens gab. Sie glaubten an die Einheit in der gesamten menschlichen Geistestätigkeit. Den heute nicht sehr verbreiteten Glauben an eine große Weltharmonie können geistig selbständige Menschen nur vermöge einer Inspiration besitzen.

Digitized by Google

Viele können wohl von einer solchen Auffassung der Natur oberflächlich mitgerissen werden, aber nur wenige vermögen in derselben auszuharren. Dazu ist ein arbeitsames Leben in der wirklichen Welt erforderlich, und es ist eine seltene Kunst, die geistige Größe der Welt zu erkennen und zugleich in der mühsamen Beschäftigung mit den Einzelheiten treu und ausdauernd zu sein. Diese Kunst verstanden aber die beiden Humboldt und die beiden Örsted.

Fig. 193.

Alexander v. Humboldt.

Daher werden die Namen dieser beiden Brüderpaare in der Geschichte der Wissenschaften stets einen ehrenvollen Platz einnehmen.

Alexander v. Humboldt war 1769 in Berlin geboren. Er wurde zusammen mit seinem Bruder Wilhelm durch Privatunterricht für das Studium vorbereitet und widmete sich von 1787 ab in Frankfurt a. d. O., Berlin, Göttingen und Freiberg naturwissenschaftlichen, mathematischen, staatswissenschaftlichen und sprachwissenschaftlichen Studien. Im Jahre 1792 wurde

Digitized by Google

er Bergassessor und bald darauf Oberbergmeister in den fränkischen Landesteilen. Er legte sein Amt 1797 nieder, um seine große Forschungsreise nach Südamerika zu unternehmen. Er und der französische Botaniker Bonpland (1773 bis 1858) erhielten von der spanischen Regierung die Erlaubnis, die spanischen Besitzungen in Amerika zu bereisen. Die Reise dauerte fünf Jahre und der Bericht über dieselbe erschien 1807 bis 1827 in Paris. Er umfaßt 30 Bände und 1425 Kupfertafeln. Humboldt hielt sich nach seiner Rückkehr einige Jahre in Berlin auf, siedelte dann nach Paris über, um die Herausgabe der Reisebeschreibung zu leiten, und kehrte 1827 nach Berlin zurück. Im Jahre 1829 schloß er sich einer Forschungsreise nach dem nördlichen Asien an, die auf Befehl des Kaisers von Rußland von Ehrenberg und G. Rose unternommen wurde.

Humboldt wollte vor allen Dingen die Naturerkenntnis veredeln. Er wollte die Naturforschung mit der gesamten geistigen Entwickelung der Menschheit in Beziehung bringen, und er suchte in seinen alten Tagen das, was er in dieser Richtung erreicht hatte, in einem großen Werke, dem „Kosmos", zusammenzustellen. In der Vorrede zu diesem großartigen Werke, welches in alle Hauptsprachen übersetzt worden ist, sagt er: „Wenn durch äußere Lebensverhältnisse und durch einen unwiderstehlichen Drang nach verschiedenartigem Wissen ich veranlaßt worden bin, mich mehrere Jahre und scheinbar ausschließlich mit einzelnen Disziplinen, mit beschreibender Botanik, mit Geographie, Chemie, astronomischen Ortsbestimmungen und Erdmagnetismus als Vorbereitung zu einer großen Reiseexpedition zu beschäftigen, so war doch immer der eigentliche Zweck des Erlernens ein höherer. Was mir den Hauptantrieb gewährte, war das Bestreben, die Erscheinungen der körperlichen Dinge in ihrem allgemeinen Zusammenhange, die Natur als ein durch innere Kräfte bewegtes und belebtes Ganze aufzufassen. Ich war durch den Umgang mit hochbegabten Männern früh zu der Einsicht gelangt, daß ohne den ernsten Hang nach der Kenntnis des Einzelnen alle große und allgemeine Weltanschauung nur ein Luftgebilde sein könne. Es sind aber die Einzelheiten im Naturwissen ihrem inneren Wesen nach fähig, wie durch eine aneignende Kraft sich gegenseitig zu befruchten. Die beschreibende Botanik, nicht mehr in den engen Kreis der Bestimmung von Geschlechtern und Arten festgebannt, führt den Beobachter, welcher ferne Länder und hohe Gebirge durchwandert, zu der Lehre von der geographischen Verbreitung der Pflanzen über den Erdboden nach Maßgabe der Entfernung vom Äquator und der senkrechten Erhöhung des Standortes. Um nun wiederum die verwickelten Ursachen dieser Verteilung aufzuklären, müssen die Gesetze der Temperaturverschiedenheit der Klimate, wie der meteorologischen Prozesse im Luftkreise erspähet werden. So führt den wißbegierigen Beobachter jede Klasse von Erscheinungen zu einer anderen, durch welche sie begründet wird oder die von ihr abhängt."

Humboldt will das gesamte Wissen von den siderischen und tellurischen Erscheinungen in seinem Werke behandeln. Das Werk soll nicht nur eine physische Erdbeschreibung, sondern eine physische Weltbeschreibung sein.

Digitized by Google

Man hat Humboldt den Aristoteles seiner Zeit genannt, und zwar nicht mit Unrecht, denn sein „Kosmos" läßt eine ganz außergewöhnliche Begabung erkennen, einzelne Erscheinungen zu sammeln und zu einem geordneten Ganzen zusammenzustellen.

Von Humboldts Tätigkeit auf dem Gebiete der Meteorologie und Klimatologie wird später die Rede sein. Seine großartige Auffassung der Aufgabe der Naturforschung wird zu allen Zeiten befruchtend wirken. Sein Einfluß war nicht nur ein vielseitiger, sondern wird auch ein dauernder sein. — Er starb 1859 im Alter von 90 Jahren.

§ 245. Von den physikalischen Erscheinungen waren es namentlich die magnetischen und die meteorologischen, für die sich Humboldt besonders interessierte. Die erdmagnetischen Verhältnisse deuten darauf hin, daß zwischen den verschiedenen Teilen der sinnlich wahrnehmbaren Natur ein Zusammenhang besteht, der vermuten läßt, daß auch das im Raum weit voneinander entfernte zusammengehört. Das Newtonsche Anziehungsgesetz schlingt ein unlösbares Band um alle Körper, Licht und Wärme werden auf Entfernungen von Millionen Meilen ausgetauscht, und die Erscheinungen des Erdmagnetismus bilden einen weiteren Beweis für die Zusammengehörigkeit weit voneinander entfernter Weltkörper. Dies hat wahrscheinlich dazu beigetragen, Humboldts Interesse für diese Erscheinungen zu erhöhen, und er veranlaßte, wie bereits erwähnt, Gauß und Weber, sich mit magnetischen Untersuchungen zu beschäftigen, denn er erkannte, daß der Überblick über die Erscheinungen durch das Studium der Einzelheiten gewonnen wird.

Die gegenseitige Einwirkung der Magnete erfuhr durch Gauß eine gründliche mathematische Bearbeitung. Eine Frucht der fortgesetzten Beschäftigung mit magnetischen Untersuchungen war das berühmte Werk „Allgemeine Lehrsätze in Beziehung auf die im verkehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung wirkenden Anziehungs- und Abstoßungskräfte" (§ 215).

Zur Messung der magnetischen Größen konstruierte Gauß geeignete Apparate, und es gelang ihm zusammen mit Weber und Humboldt, einen „magnetischen Verein" zu gründen, der nach einem verabredeten Plan arbeitete. Auf diese Weise wurden die Resultate zahlreicher Beobachtungen erhalten, die an verschiedenen Orten zu gleicher Zeit gemacht worden waren. — Humboldt hatte nach der Rückkehr von seiner asiatischen Reise die Akademie der Wissenschaften in Petersburg veranlaßt, im ganzen Reich magnetische und meteorologische Stationen, sowie in der Hauptstadt eine Zentralstation anzulegen. Der magnetische Verein verfügte daher über eine große Anzahl von Stationen in allen Ländern Europas. An sieben Tagen im Jahre wurden an diesen Stationen die magnetischen Größen gemessen. Das gewonnene Material wurde von Gauß und Weber bearbeitet und veröffentlicht.

Weber war einer der bekannten sieben Göttinger Professoren, die 1837 ihres Amtes enthoben wurden, weil sie die vom neuen Regenten eingeführte reaktionäre Verfassung nicht anerkannten. Weber blieb jedoch bis 1843

Digitized by Google

in Göttingen, um gemeinsam mit Gauß die magnetischen Beobachtungen fortzusetzen und die Ergebnisse zu bearbeiten. Von 1843 bis 1847 war Weber Professor in Leipzig. In dem letzteren Jahre wurde er nach Göttingen zurückberufen. Gauß starb 1855, Weber 1891.

§ 246. Wie man sich erinnern wird, mußte Hansteen bei der Erklärung der erdmagnetischen Verhältnisse seine Zuflucht zu Halleys Annahme von vier Magnetpolen nehmen, und doch gelang es ihm nicht, die Tatsachen mit der Theorie in Einklang zu bringen. Gauß verwarf daher die Annahme einer magnetischen Achse oder mehrerer Achsen in der Erde. Er ging mehr von Gilberts klar ausgesprochener Hypothese aus, daß die Erde ein großer Magnet ist. Dies muß jedoch so verstanden werden, daß die Erde deshalb ein großer Magnet ist, weil sich in ihr und auf ihr eine große Anzahl kleiner Magnete befindet. Die Gesamtwirkung dieser zahlreichen Einzelmagnete ist es, die den Erdmagnetismus ausmacht. Gauß ging, mit anderen Worten, von der Tatsache aus, daß sich auf und in der Erde magnetische Teile finden, deren jeder gleiche Mengen Nordmagnetismus und Südmagnetismus enthält. Da nun die Magnetkraft eine Fernwirkung ist, die das allgemeine Gesetz der Fernkräfte befolgt, so müssen die Einzelmagnete sich überall geltend machen und an jeder beliebigen Stelle zusammen wie ein großer Magnet wirken (vgl. § 216).

Gauß stellte nun eine mathematische Formel auf, vermittelst deren sich die Größe und Richtung der magnetischen Kraft für jeden Ort auf der Erdoberfläche bestimmen ließ. — Selbstverständlich wird durch die Gaußsche Formel nichts über das Wesen des Erdmagnetismus und sein Verhältnis zu anderen Naturkräften gesagt, ebensowenig wie das Newtonsche Anziehungsgesetz etwas über die Ursache der Anziehungskraft aussagt. Gauß suchte und fand weiter nichts als einen Ausdruck für die tatsächlichen Verhältnisse. Auf die Frage über das Wesen des Erdmagnetismus werden wir später (in dem Abschnitt über die Elektrizitätslehre) zurückkommen.

§ 247. Auch die von Graham entdeckte tägliche Schwankung sowie andere periodische Schwankungen des Erdmagnetismus hat man auf den zahlreichen Observatorien genau beobachtet. Auf der nördlichen Halbkugel befindet sich die Deklinationsnadel zwischen 7 und 8 Uhr morgens in ihrer östlichsten, und zwischen 1 und 2 Uhr mittags in ihrer westlichsten Lage. Auf der südlichen Halbkugel ist die Wanderung der Nadel die entgegengesetzte. Die tägliche Veränderung, die in den Äquatorialgegenden am geringsten, an den Polen am größten ist, hat je nach den Jahreszeiten, also nach der Stellung der Sonne am Himmel, verschiedene Größe. Der Einfluß der Sonne auf den Erdmagnetismus macht sich auch durch die Sonnenflecke deutlich bemerkbar. Johann Lamont (1805 bis 1879), Direktor der Sternwarte in München, machte 1851 darauf aufmerksam, daß die Änderung der Deklination eine Periode von ungefähr $10^1/_2$ Jahren hat, und 1852 zeigte R. Wolf (1816 bis 1893) in Zürich, daß diese Periode des Erdmagnetismus mit der Periode der Sonnenflecken zusammenfällt. In Jahren mit vielen Sonnen-

Digitized by Google

flecken ist die Magnetnadel unruhig und schwingt stärker als in Jahren mit wenig Sonnenflecken.

Daß der Einfluß der Sonne auf den Erdmagnetismus nicht einfach eine Wärmewirkung ist, hat man daraus schließen zu können geglaubt, daß auch die Stellung des Mondes und anderer Himmelskörper auf die Magnetnadel einwirkt.

Was die Bewegung der Inklinationsnadel betrifft, so ist die Neigung um 11 Uhr vormittags am größten und um 8 Uhr abends am kleinsten. Die horizontale Magnetkraft ist um 11 Uhr am kleinsten und um 8 Uhr am größten.

Die Veränderungen der Deklination, der Inklination und der horizontalen Magnetkraft sind im Sommer größer als im Winter.

§ 248. Man darf jedoch nicht glauben, daß diese täglichen Änderungen sehr regelmäßig und leicht zu beobachten sind. Die Magnetnadel ist vielmehr fortwährend in Unruhe. Unregelmäßige magnetische Störungen sind fast immer zu beobachten. Wenn sie besonders stark sind, nennt man sie *magnetische Gewitter*.

Die Ursache eines solchen Gewitters kann ein Sonnenfleck sein. Ein derartiges Gewitter, welches sowohl in der Alten, als auch in der Neuen Welt beobachtet wurde, fand am 13. und 14. Februar 1892 statt. Es begann, als ein mit bloßem Auge sichtbarer Sonnenfleck die Mitte der Sonnenscheibe passierte. In Kopenhagen machte die Magnetnadel einen Ausschlag von $1^0 20'$. Die horizontale Magnetkraft nahm während der Störung zu, nahm aber dann sehr schnell an Stärke ab. Im nördlichen Norwegen, wo das magnetische Gewitter ebenfalls beobachtet wurde, schlug die Nadel um 12^0 aus, und überall auf der Erde machten sich in den Telegraphenleitungen elektrische Ströme in störender Weise bemerkbar.

Auch Nordlichter und Erdbeben wirken stark auf die Magnetnadel ein. So war z. B. ein Erdbeben in Griechenland von Schwingungen der Magnetnadel in ganz Mitteleuropa begleitet.

Es ist sehr wichtig, diese magnetischen Störungen zu verfolgen. Eine vollständige Beobachtung derselben läßt sich nur mit Hilfe von selbstregistrierenden Apparaten ausführen, die die Schwingungen der Nadel durch einen Lichtstrahl aufzeichnen, der auf lichtempfindliches Papier fällt.

Mit der an einem seidenen Faden aufgehängten Deklinationsnadel ist ein Spiegel verbunden, der die Schwingungen der Nadel mitmacht. Ein Lichtstrahl, der vermittelst einer Linse auf den Spiegel geworfen wird, wird von diesem zurückgeworfen und fällt auf ein Stück lichtempfindliches Papier, welches um eine Walze herumgelegt ist, die durch ein Uhrwerk in gleichförmige Drehung versetzt wird. Der Lichtstrahl erzeugt also auf dem Papier eine den Schwingungen der Nadel entsprechende Wellenlinie.

Auch die Schwingungen der Inklinationsnadel lassen sich in ähnlicher Weise registrieren. In diesem Falle muß der Spiegel die Schwingungen der Inklinationsnadel mitmachen. Man bringt die Inklinationsnadel durch ein

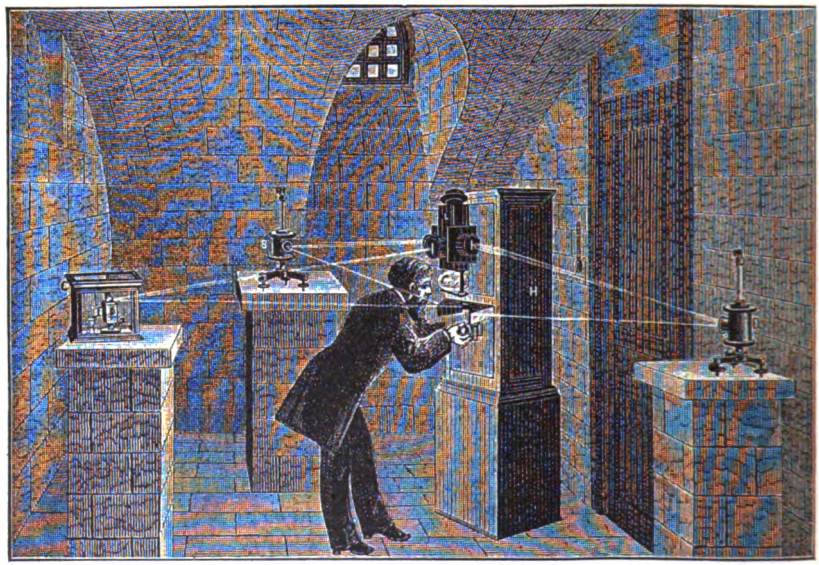
Digitized by Google

kleines Übergewicht in horizontale Lage. Wenn dann die vertikale Komponente der Magnetkraft größer wird, so geht das Nordende der Nadel etwas nach unten, wenn sie kleiner wird, so geht das Nordende der Nadel etwas nach oben, und der Spiegel macht dieselben Bewegungen.

Die Messung der horizontalen Komponente der Magnetkraft geschieht vermittelst einer an zwei Drähten (bifilar) aufgehängten Deklinationsnadel. Wenn die Drähte keine Torsion haben, steht die Nadel im magnetischen Meridian. Durch Drehung des Torsionskopfes zwingt man die Nadel, sich senkrecht auf den magnetischen Meridian zu stellen.

Wenn sich die horizontale Komponente der Magnetkraft ändert, so wird sich eine so aufgehängte Magnetnadel offenbar drehen, und zwar so, daß der

Fig. 194.



Selbstregistrierende Apparate zur Beobachtung des Erdmagnetismus.

Nordpol der Nadel etwas zurückgeht, wenn die Magnetkraft größer wird, sich dagegen noch etwas weiter entfernt, wenn die Magnetkraft kleiner wird.

Wie die selbstregistrierenden Apparate aufgestellt werden, ist aus Fig. 194 zu ersehen. Der Apparat steht in einem Keller, damit er vor Erschütterungen und Temperaturschwankungen geschützt ist. Der Kasten H enthält das Uhrwerk, durch welches die Walze mit dem lichtempfindlichen Papier gedreht wird. Die Lampe L sendet Lichtstrahlen nach dem Deklinationsapparat D, dem Inklinationsapparat C und dem Apparat B für die horizontale Magnetkraft. Von den Spiegeln der drei Apparate wird je ein Lichtstrahl auf das lichtempfindliche Papier geworfen, auf das der Lichtstrahl die Schwingungen der betreffenden Nadel aufzeichnet. Fig. 195 zeigt die Kurven, welche während des

Digitized by Google

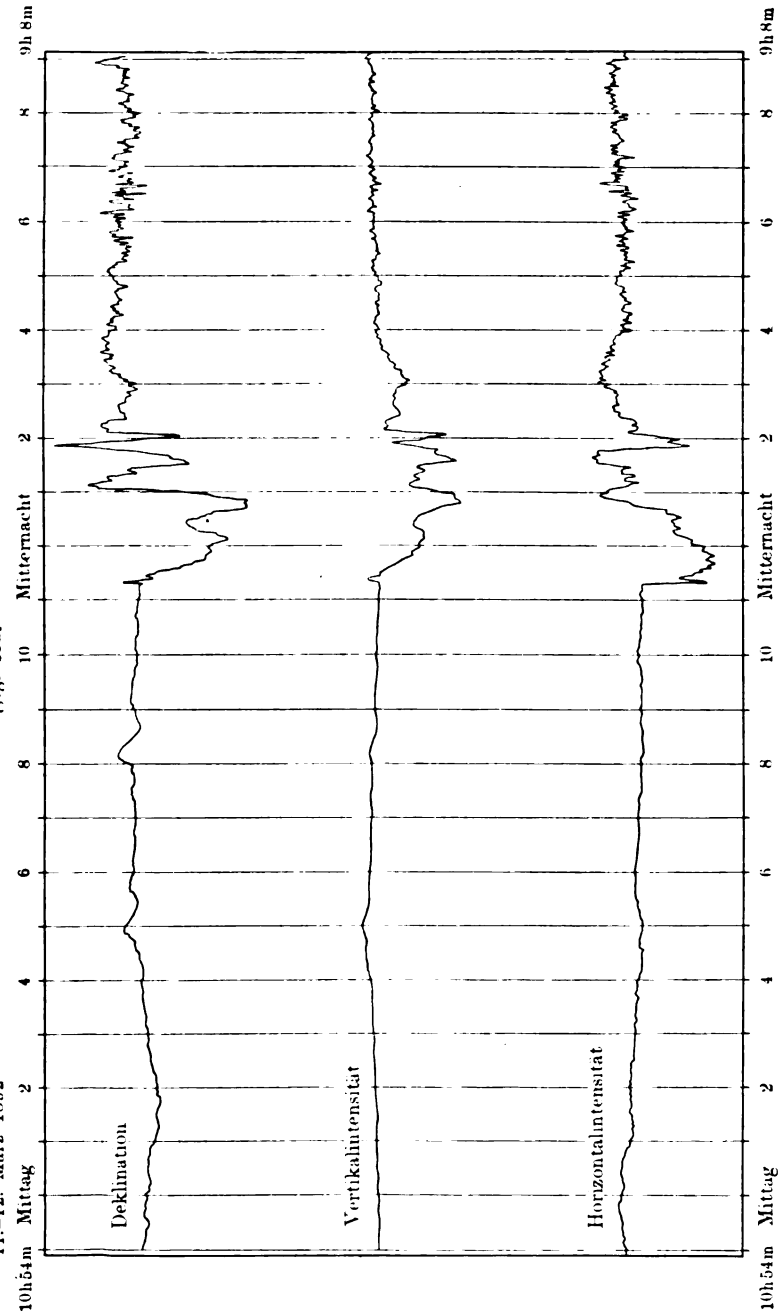


Fig. 195.

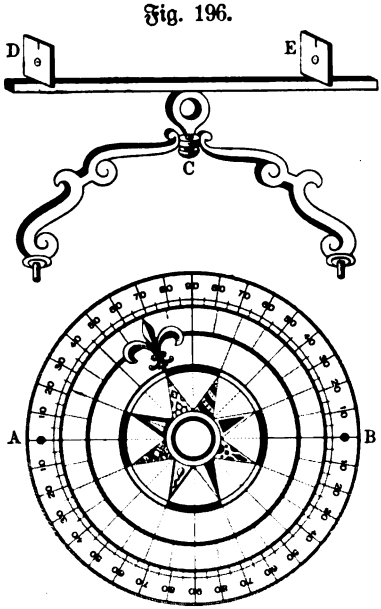
Schwingung der Magnetnadel während eines magnetiſchen Gewitters.

Digitized by Google

Gewitters am 11. und 12. März 1892 von den Apparaten des magnetischen Observatoriums in Kopenhagen aufgezeichnet wurden. Die Zeichnungen sind leicht zu verstehen. Wenn die Nadeln in Ruhe gewesen wären, so würden sie gerade Linien gezeichnet haben. Die Abweichungen von der geraden Linie zeigen also Bewegungen an. Die vertikale Magnetkraft wird am Inklinationsapparate beobachtet, die horizontale Magnetkraft an der bifilar aufgehängten Magnetnadel.

§ 249. Die ältesten europäischen Schiffskompasse bestanden aus einer Magnetnadel, die an einem Stück Kork befestigt war, welches man in einer Schale auf Wasser schwimmen ließ (vgl. § 193, Fig. 156). Aber bereits zur Zeit Gilberts war der Kompaß ebenso eingerichtet wie heutzutage. Fig. 196 ist die Abbildung eines Kompasses aus Gilberts Buch „De magnete". Die Magnetnadel selbst sieht man nicht. Sie ist nämlich auf der Unterseite einer leichten runden Scheibe befestigt, auf deren Oberseite die verschiedenen Himmelsgegenden angegeben sind. Es ist allgemein gebräuchlich, die Stelle des Nordpols durch das heraldische Bild einer Lilie zu bezeichnen, die bekanntlich das Wappen der Könige von Frankreich bildet. Der Urheber dieses Gebrauches soll Flavio Gioja (§ 197) gewesen sein, der durch das Bild der Lilie den Fürsten von Neapel, der einem französischen Grafengeschlecht entstammte, ehren wollte.

Fig. 196.



Gilberts Kompaß.

Die Kompaßscheibe wird von den Seeleuten Kompaßrose oder Windrose genannt. Sie besteht zunächst aus einem achtstrahligen Stern, dessen Spitzen Nord, Nordost, Ost, Südost, Süd, Südwest, West und Nordwest angeben. Auf einem Kreise, der den achtstrahligen Stern einschließt, sind auch die Richtungen zwischen Nord und Nordost, Nordost und Ost u. s. w. bezeichnet. Diese Richtungen heißen Nordnordost, Ostnordost, Ostsüdost, Südsüdost u. s. w. Auf den Kreis, der in 16 Teile geteilt ist, folgt ein weiterer Kreis, der in 32 Teile geteilt ist. Wer diese Teilung eingeführt hat, ist nicht bekannt, aber man weiß, daß sie seit dem Ende des 16. Jahrhunderts in Holland in Gebrauch gewesen ist. Jetzt ist sie allgemein in Gebrauch.

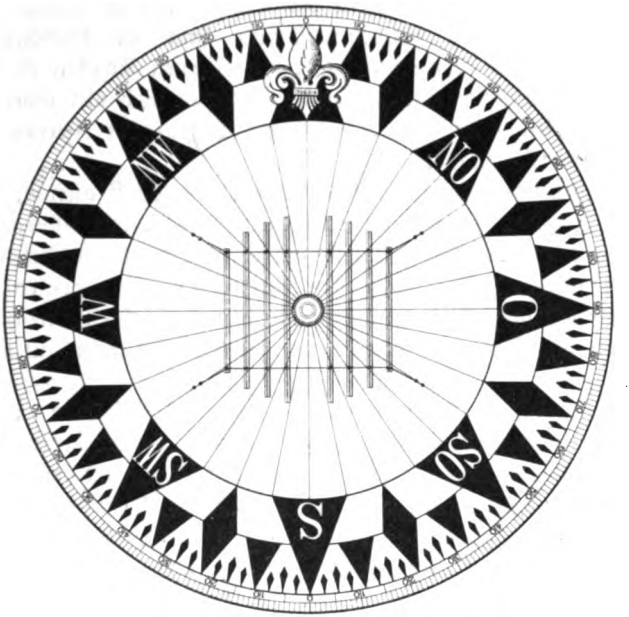
Gilberts Kompaß war außerdem mit einem Visier versehen, welches mit zwei Zapfen in einen die Kompaßscheibe umgebenden, aber nicht mit dieser verbundenen Kreis eingesetzt wurde. Dieser Kreis war von den Zapfen-

Digitized by Google

löchern *A* und *B* aus mit der gewöhnlichen Kreisteilung versehen (Teilkompaß).

Die Magnetnadel des Kompasses ruht, ähnlich wie die Nadel in Fig. 155 (S. 193), auf einer Spitze, so daß sie sich in der horizontalen Ebene un-

Fig. 197.

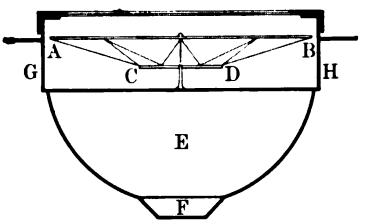


Lord Kelvins Kompaß.

gehindert drehen kann. Sie stellt sich dann in den magnetischen Meridian und die Lilie auf der Rose zeigt nach Norden. Richtet man dann das Visier auf irgend einen anderen Gegenstand, so kann man auf der Rose ablesen, um welchen Winkel die Visierlinie von der Nordsüdrichtung abweicht.

In Fig. 197 ist eine Kompaßscheibe abgebildet, wie sie heutzutage nach der Anweisung des berühmten englischen Physikers Lord Kelvin (William Thomson) konstruiert wird. Acht schmale, aber kräftige Magnetnadeln werden von seidenen Fäden getragen, die das Hütchen, auf dem die Scheibe ruht, mit dem Rande der Scheibe verbinden. Wie die Scheibe aufgehängt wird, ist aus Fig. 198 zu ersehen. *AB* ist die Rose, *CD* sind die Magnete, welche von den seidenen Fäden getragen werden. Der geschlossene Raum *E* enthält eine zähe Flüssigkeit, und *F* ist ein schweres Gewicht. Die ganze Vorrichtung hängt mit

Fig. 198.



Aufhängung der Kompaßscheibe.

Digitized by Google

den Zapfen G und H in einer Cardanischen Aufhängung (vgl. I, § 129).

§ 250. Beim Gebrauch des Kompasses muß selbstverständlich die Deklination für den betreffenden Ort bekannt sein, d. h. der Seefahrer muß im Besitz zuverlässiger Deklinationskarten sein. Sodann muß aber auch der Einfluß bekannt sein, den die Eisenteile des Schiffes auf die Kompaßnadel ausüben. Selbst in einem hölzernen Schiffe kann die Kompaßnadel vom magnetischen Meridian abweichen. Bei den eisernen Schiffen ist der Einfluß des Eisens auf die Magnetnadel selbstverständlich noch viel bedeutender, als bei einem hölzernen Schiff, in dem sich der Einfluß der eisernen Ketten und der Anker bemerklich macht.

Die magnetischen Kräfte, welche ein eisernes Schiff ausübt, rühren zum Teil daher, daß das Schiff ein permanenter Magnet mit festliegenden Polen ist, zum Teil daher, daß die Eisenteile des Schiffes durch den Erdmagnetismus magnetisiert werden. Die durch den letzteren Einfluß erzeugten Pole haben aber je nach der augenblicklichen Richtung des Schiffes eine wechselnde Lage. Endlich wirkt das Eisen des Schiffes wie jedes andere Eisen auf die Kompaßnadel ein.

Den permanenten Magnetismus nimmt ein Schiff in der Regel an, während es gebaut wird. Die einzelnen Teile des Schiffskörpers befinden sich während des Baues längere Zeit in derselben Lage, und durch die wiederholten Erschütterungen beim Zusammenhämmern der Teile wird die verteilende Wirkung des Erdmagnetismus erhöht (vgl. § 219). Wohin die dem permanenten Magnetismus entsprechenden Pole zu liegen kommen, hängt natürlich von der Richtung ab, in welcher sich das Schiff während des Baues befand. Der nach Norden gerichtete Teil erhält den magnetischen Nordpol, der nach Süden gerichtete Teil den magnetischen Südpol.

Wenn ein Kompaß auf ein eisernes Schiff gebracht wird, so zeigt die Nadel nur in einer einzigen Lage richtig. Man muß daher die Wirkung des Schiffes auf die Kompaßnadel dadurch zu vernichten suchen, daß man in der Nähe desselben Magnete anbringt. Vollständig wird dies selten erreicht, und man muß fortwährend untersuchen, ob nicht im Magnetismus des Schiffes oder der ausgleichenden Magnete Veränderungen eingetreten sind.

Wenn der Kompaß auf einem Schiff richtig zeigt, wenn sich das Schiff in einer bestimmten Richtung befindet, so kann er nicht richtig zeigen, wenn das Schiff gedreht wird, selbst wenn der permanente Magnetismus aufgehoben ist, weil das weiche Eisen des Schiffes vom Erdmagnetismus anders magnetisiert wird, sobald das Schiff in eine andere Lage kommt. Zu einem Schiffskompaß gehört daher auch eine Tabelle über die Mißweisung der Nadel je nach der Richtung, in der sich das Schiff befindet. Diese Tabelle erhält man dadurch, daß man das Schiff auf der Reede eine volle Drehung machen läßt und für jede beliebige Richtung die Abweichung der Nadel bestimmt.

Digitized by Google

Die Elektrizität.

Entdeckungen und Erkenntnisse vor 1790.

Digitized by Google

Digitized by Google

Die Zeit vor Gilbert.

§ 251. Der Bernstein spielte im Altertume eine sehr wichtige Rolle für die Bewohner der Ostseeküste und der Nordseeküste, da er als Tauschmittel für die Metalle der Mittelmeervölker diente.

Ob die Griechen den Bernstein zuerst durch phönizische Seefahrer erhalten haben oder auf dem Landwege, ist zweifelhaft. Jedenfalls ist eine große Menge Bernstein durch Zwischenhandel die Oder und Weichsel entlang bis zur Donau und weiter zum Po, anderseits direkt nach Griechenland gekommen. Thales von Milet soll gewußt haben, daß der Bernstein durch Reiben die Eigenschaft bekommt, leichte Körper, z. B. Stroh, anzuziehen. Diese Beobachtung, welche dem Thales zugeschrieben wird, ist vielleicht ganz zufällig gemacht worden. Da der Bernstein zu Schmucksachen verarbeitet wurde, hat man vielleicht schon bei der Bearbeitung, vielleicht auch, wenn die fertigen Stücke (Perlen) gerieben wurden, um ihren Glanz zu erhöhen oder zu erneuern, beobachtet, daß diese Stücke im geriebenen Zustande Haare, Federn und dergleichen anzogen.

Daß unkultivierte Völker dieselbe Beobachtung an anderen Gegenständen als gerade am Bernstein gemacht haben, erzählt Humboldt im „Kosmos“: „Nicht ohne Überraschung bemerkte ich auch an den waldigen Ufern des Orinoko, bei den Kinderspielen der Wilden, unter Volksstämmen, die auf der untersten Stufe der Roheit stehen, daß ihnen die Erregung der Elektrizität durch Reibung bekannt ist. Knaben rieben die trockenen, platten und glänzenden Samen eines rankenden Schotengewächses so lange, bis sie Fasern von Baumwolle und Bambusrohr anzogen.“

Bei anderen Körpern haben die Griechen, wie es scheint, die Eigenschaft, durch Reiben elektrisch zu werden, nicht beobachtet, vielleicht mit einer einzigen Ausnahme. Theophrastus (371 v. Chr), der bedeutendste Geologe und Botaniker des Altertums, nennt nämlich außer dem Bernstein einen Stein Lynkurion, der durch Reiben anziehend wird. Welcher Stein gemeint ist, weiß man nicht, wahrscheinlich ein Edelstein deren es mehrere gibt, die die erwähnte Eigenschaft besitzen. Auch Aristoteles kennt die anziehende Wirkung des Bernsteins, bemerkt aber, daß sie bedeutend schwächer ist als die Anziehungskraft des Magneten.

Digitized by Google

Sowohl Thales als auch Aristoteles glaubten übrigens, daß die Anziehungskraft des Bernsteins ihre Ursache darin habe, daß dieser beseelt werde. Später wurde allgemein angenommen, daß die merkwürdige Anziehungskraft durch die bei der Reibung entstehende Wärme hervorgerufen werde.

Ebensowenig wie bei den Griechen wurden diese Erscheinungen bei den Arabern weiter aufgeklärt. Doch wird von den letzteren außer dem Bernstein noch ein zweiter Stoff, der Gagat (Pechkohle), genannt, der die Eigenschaft hat, trockene Strohteilchen anzuziehen, wenn er gerieben worden ist.

Auch die Forscher des Mittelalters blieben auf derselben Stufe stehen. Der anziehende Bernstein wird zwar oft genannt und bildet einen Gegenstand der Bewunderung, aber er gab nicht den Anstoß zu weiteren Untersuchungen. — Es ist fast zu verwundern, daß die Alchemisten bei ihren vielseitigen Bearbeitungen der damals bekannten Stoffe nicht zufällig die Entdeckung gemacht haben, daß der Bernstein keineswegs der einzige Stoff ist, der durch Reiben anziehend wird.

§ 252. Erst als die Renaissance die gelehrte Welt zu dem Studium der alten Autoren zurückführte, gaben die von diesen überlieferten vereinzelten Beobachtungen fruchtbare Anregungen. Ja sogar Aristoteles gewann eine ganz neue Bedeutung für die Naturwissenschaften, als man anfing, seine Werke selbst zu studieren, anstatt sich in scholastischer Weise nur mit den Kommentaren zu beschäftigen. Der Spanier Ludovico Vives (1492 bis 1540), ein Freund des Erasmus von Rotterdam, hebt nachdrücklich hervor, daß man nicht einmal im Geiste des Aristoteles handle, wenn man mit seinen Fragen nur auf ihn, und nicht auf die Natur selbst zurückgehe, denn eine wirkliche Kenntnis der Natur erreiche man nicht durch sinnreiche Hypothesen und überlieferte Erzählungen.

Der Übergang zur freien Forschung vollzog sich allerdings langsam, aber schließlich kam man doch so weit, daß man auf den Erkenntnissen der Alten weiterbaute. Auch die Beobachtung, daß der Bernstein eine eigentümliche Kraft annimmt, wenn er gerieben wird, bildete den Ausgangspunkt für neue Forschungen.

§ 253. William Gilbert, den wir schon auf einem anderen Gebiete der Physik als bahnbrechenden Forscher kennen gelernt haben (§ 204), legte sich die Frage vor, ob es nicht außer dem Bernstein und dem Gagat noch andere Stoffe gibt, die beim Reiben dieselbe Eigenschaft annehmen wie diese. Es ist das große Verdienst Gilberts, diese Frage, die sich gewiß auch früher schon andere vorgelegt hatten, durch Versuche beantwortet zu haben. Es zeigte sich bei diesen Versuchen, daß es noch zahlreiche andere Stoffe gibt, die dasselbe Verhalten wie der Bernstein zeigen. Gilbert nennt u. a. den Diamant, den Saphir, den Amethyst, den Bergkristall, Schwefel und Harz. Alle diese Stoffe werden beim Reiben anziehend. Anderseits fand er auch, daß es viele Körper gibt, welche beim Reiben nicht anziehend werden. Zu diesen gehören z. B. Smaragd, Achat, Perlen, Marmor, Knochen und alle Metalle.

Digitized by Google

§ 254. Gilbert gab nun dieser merkwürdigen Anziehungskraft einen Namen, er nannte sie elektrische Kraft, weil sie zuerst am Bernstein beobachtet worden war, dessen griechischer Name „Elektron" ist. Von der Bezeichnung „elektrische Kraft" wurde später das Wort „Elektrizität" gebildet. Gilbert selbst gebraucht dieses Wort nicht, dagegen bezeichnet er die Körper, je nachdem sie durch Reiben anziehend werden oder nicht, als elektrische und unelektrische.

Gilbert war ein geschickter Experimentator und aufmerksamer Beobachter. Er fand bei seinen Versuchen sehr bald, daß alle Körper, einerlei ob sie zu der Gruppe der „elektrischen" oder zu der Gruppe der „unelektrischen" gehören, von einem elektrisierten Körper, d. h. von einem Körper, der durch Reibung anziehend gemacht worden ist, angezogen werden. Er zeigte dies in der Weise, daß er Stäbchen aus verschiedenen Substanzen wie eine Kompaßnadel auf einer Spitze schweben ließ, so daß sie sich ohne merkliche Reibung drehen konnten. Wurde einem solchen Stäbchen ein elektrisierter Körper angenähert, so wurde es angezogen, gleichviel aus welchem Stoffe es bestand. Er zeigte ferner, daß auch Flüssigkeiten von einem elektrisierten Körper angezogen werden, und fand, daß Luft, Flammen und glühende Körper nicht angezogen werden.

Es müssen jedoch gewisse Bedingungen erfüllt sein, wenn die elektrischen Versuche gelingen sollen. Gilbert bemerkte, daß die Elektrisierung bei Sonnenschein und in trockener Luft, wie man sie in London bei Nordwind und bei Ostwind hat, viel besser gelingt als in feuchter Luft, bei Südwind oder Westwind. Wenn der elektrisierte Körper von feuchter, z. B. von ausgeatmeter Luft umgeben ist oder wenn er mit Wasser oder Spiritus besprengt wird, so wird die Elektrizität des Körpers in hohem Grade geschwächt oder sogar vollständig vernichtet. Ein Besprengen mit Öl übt dagegen keinen nachteiligen Einfluß aus.

§ 255. Gilbert experimentierte sowohl mit der Elektrizität, als auch mit dem Magnetismus, aber er machte im Gegensatz zu früheren Forschern einen scharfen Unterschied zwischen der elektrischen Kraft und der magnetischen Kraft. Er schreibt: 1. Die elektrische Kraft wird durch Reibung hervorgerufen; die magnetische Kraft dagegen ist immer und natürlich im Magneten vorhanden. 2. Die Elektrizität verschwindet in feuchter Luft, während der Magnet seine Kraft behält, einerlei mit welchen Gegenständen er in Berührung kommt. 3. Die Elektrizität zieht alle Körper an, der Magnet nur ganz wenige. — Aus diesen und mehreren anderen Verschiedenheiten schließt Gilbert, daß die elektrische Kraft und die magnetische Kraft wesentlich voneinander verschieden sind, und er nahm in Übereinstimmung mit älteren Theorien an, daß die elektrische Kraft dadurch verursacht wird, daß während des Reibens aus dem Körper „etwas" ausströmt.

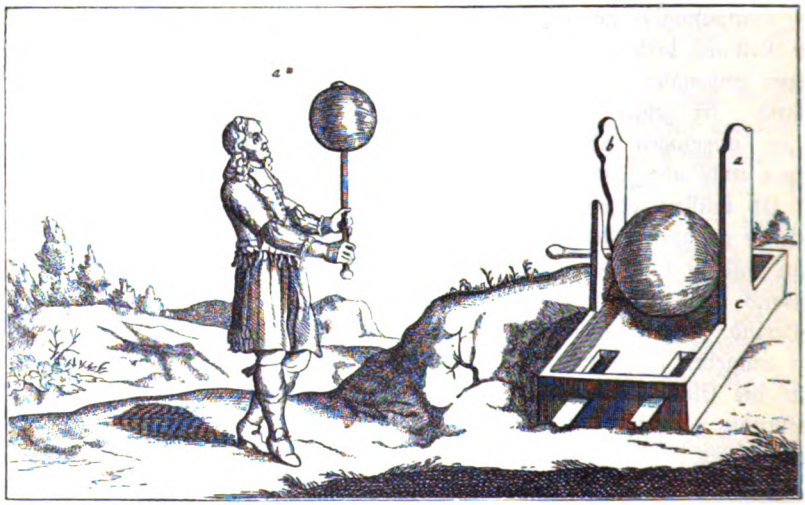
§ 256. Die Beobachtungen Gilberts, deren Resultate in der Schrift „De Magnete" veröffentlicht wurden, veranlaßte viele andere Physiker, die Versuche Gilberts zu wiederholen und neue Versuche auszuführen. Den

Digitized by Google

beiden Gruppen der elektrischen und der unelektrischen Körper wurden immer neue Glieder hinzugefügt und es wurden andere interessante Beobachtungen gemacht. Die Accademia del Cimento entdeckte z. B., daß ein elektrisierter Körper seine Elektrizität verliert, wenn er in die Nähe einer Flamme gebracht wird.

Aber der erste große Fortschritt, den die Elektrizitätslehre nach dem Tode Gilberts machte, knüpft sich an den Namen des berühmten Magdeburger Bürgermeisters Otto von Guericke. Bei seiner Vorliebe für großartige Versuche war er der rechte Mann dazu, die Sache weiterzuführen. Es handelte sich vor allen Dingen darum, deutlichere Wirkungen der Elektrizität zu erzielen. Gilbert und seine nächsten Nachfolger hatten sich damit begnügt,

Fig. 199.



Otto von Guerickes Elektrisiermaschine.

kleinere „elektrische" Körper zu reiben und die elektrische Anziehung derselben zu beobachten. Guericke dagegen konstruierte eine Maschine, vermittelst deren Elektrizität erzeugt werden konnte. Er verfertigte eine Schwefelkugel, indem er eine Glaskugel mit geschmolzenem Schwefel füllte und diese zerschlug, nachdem der Schwefel erstarrt war. Die Kugel wurde dann mit einer eisernen Achse versehen und so in einem Gestelle angebracht, daß sie um die Achse gedreht werden konnte (Fig. 199).

Die Schwefelkugel war also der Körper, der durch Reiben elektrisiert werden sollte. Das Reiben bewerkstelligte Guericke in der Weise, daß er die Hand gegen die Kugel drückte und diese dann in Drehung versetzte.

Mit dieser ersten Elektrisiermaschine machte Guericke mehrere wichtige Entdeckungen. Die Schwefelkugel wurde viel stärker elektrisch als ein Stück

Digitized by Google

Bernstein, mit dem Gilbert experimentierte. Guericke beobachtete unter anderem, daß eine Flaumfeder von der elektrisierten Kugel zuerst angezogen, aber dann, wenn sie mit der Kugel in Berührung gekommen war, von dieser abgestoßen wurde. Ja er konnte die Flaumfeder in der Luft schwebend erhalten, wenn er die Kugel aus dem Gestell nahm und unter die Feder hielt. Hiermit hatte er entdeckt, daß es nicht nur eine elektrische Anziehung, sondern auch eine elektrische Abstoßung gibt. Zu seiner Verwunderung beobachtete Guericke weiter, daß die Feder, welche mit der elektrisierten Schwefelkugel in Berührung gewesen war, von seinem Körper, z. B. von seiner Nase, angezogen wurde. Sobald sie aber mit seinem Körper in Berührung gewesen war, wurde sie wieder von der Schwefelkugel angezogen.

Guericke beobachtete ferner, daß sich die elektrische Kraft in einem leinenen Faden fortpflanzen kann. Er hing einen ellenlangen Faden an einem Holzstabe auf und näherte dem oberen Ende des Fadens die geriebene Schwefelkugel. Dann konnte der Faden am unteren Ende leichte Gegenstände anziehen, gerade so, als ob er elektrisiert worden wäre.

Die merkwürdigste Beobachtung machte er jedoch, als er die Kugel in einem dunkeln Zimmer elektrisierte. Es zeigte sich nämlich ein deutliches, wenn auch schwaches und unruhiges Licht an der reibenden Hand, und das Licht war von einem knisternden Geräusch begleitet. Dieses „elektrische Licht" kam ihm sehr wunderbar vor. Wenn die Schwefelkugel elektrisiert war, gab sie immer ein Geräusch von sich. Wenn er sein Ohr annäherte, so hörte er stets ein knisterndes Geräusch.

Ein anderer interessanter Versuch, den Guericke anstellte, war der folgende. Er führte die elektrisierte Kugel um eine an einem Faden aufgehängte Flaumfeder herum. Diese drehte sich so um die Kugel, daß sie derselben immer dieselbe Seite zuwandte. Die Feder kam also in Drehung, und Guericke hatte sofort den Gedanken, daß die rotierenden Bewegungen der Erde und der Himmelskörper durch elektrische Kräfte hervorgerufen werden (vgl. § 209).

§ 257. Diese Entdeckungen Guerickes, so interessant sie auch waren, fanden zunächst wenig Beachtung. Es verging eine geraume Zeit, bevor die elektrische Abstoßung, die Leitung der elektrischen Kraft und die elektrische Lichterscheinung genauer untersucht wurden.

Robert Boyle (I, § 255) wurde durch die Lektüre von Guerickes „Nova Experimenta", die im Jahre 1672 erschienen, nicht nur zu Versuchen mit der Luftpumpe, sondern auch zu elektrischen Untersuchungen angeregt. Er beobachtete, daß nicht nur ein elektrisierter Körper einen nichtelektrisierten, sondern auch ein nichtelektrisierter einen elektrisierten anziehen kann. Die Wirkung ist also eine gegenseitige, ebenso wie die Wirkung zwischen einem Magnetpol und einem Stück Eisen. — Boyle zeigte ferner, daß die elektrische Kraft im luftleeren Raume wirkt, und fand, daß die Oberfläche eines Körpers

Digitized by Google

rein, warm und glatt sein muß, wenn der Körper durch Reibung kräftig elektrisch werden soll.

Sehr bezeichnend für das damalige Wissen über die Elektrizität ist es, daß Newton der Royal Society eine Vorrichtung, die heute als Spielzeug bekannt ist, als einen äußerst interessanten elektrischen Apparat vorlegte. Auf einer hölzernen Scheibe liegt ein Ring und auf diesem eine Glasplatte. In dem Zwischenraume zwischen der hölzernen Scheibe und der Glasplatte befinden sich Papierschnitzel. Wenn die Glasplatte durch Reiben elektrisch gemacht wird, so werden die Papierschnitzel von der Platte angezogen und dann abgestoßen. Sobald sie mit dem Holz in Berührung gewesen sind, werden sie von der Glasplatte wieder angezogen, dann wieder abgestoßen, u. s. w. Es ist dieselbe Erscheinung, die Guericke in anderer Weise, nämlich vermittelst der Schwefelkugel und der Flaumfeder, hervorgerufen hatte. Aber weder Guericke noch Newton gibt eine Erklärung, wie die Erscheinung zustande kommt.

§ 258. Die elektrische Lichterscheinung wurde selbstverständlich von allen hervorgerufen, die sich mit elektrischen Versuchen beschäftigten, und man suchte durch sorgfältig ausgeführte Versuche eine möglichst starke Wirkung zu erzielen. Um das Jahr 1700 gelang es einem Engländer Wall, ein Stück Bernstein so stark zu elektrisieren, daß ein elektrischer Funken vom Bernstein auf seinen Finger übersprang. Der Funken war von einem Geräusch begleitet, welches an das Geräusch erinnert, welches man hört, wenn Steinkohle im Feuer zerspringt. Daß Wall bei seinen Versuchen recht kräftige Wirkungen erzielt hat, kann man daraus schließen, daß er den elektrischen Funken und das mit ihm verbundene Geräusch mit dem Blitz und dem Donner verglich.

Wichtige Untersuchungen wurden von Francis Hawksbee, Konservator der physikalischen Sammlung der Royal Society, im Jahre 1709 veröffentlicht. Näheres über die Lebensverhältnisse dieses Mannes ist merkwürdigerweise nicht bekannt, obwohl er Mitglied der genannten Gesellschaft war und 43 Abhandlungen veröffentlicht hat, die den verschiedenen Gebieten der Physik angehören.

In dem im Jahre 1709 erschienenen Buche werden zahlreiche Versuche, unter anderem „verschiedene überraschende Erscheinungen betreffend das Licht und die Elektrizität", beschrieben. Die „Maschinen", welche zur Ausführung der Versuche dienten, sind auf Kupfertafeln abgebildet.

Zunächst wird die für die damalige Zeit am meisten „moderne" Maschine, die Luftpumpe nebst einigen der wichtigsten Anwendungen derselben beschrieben.

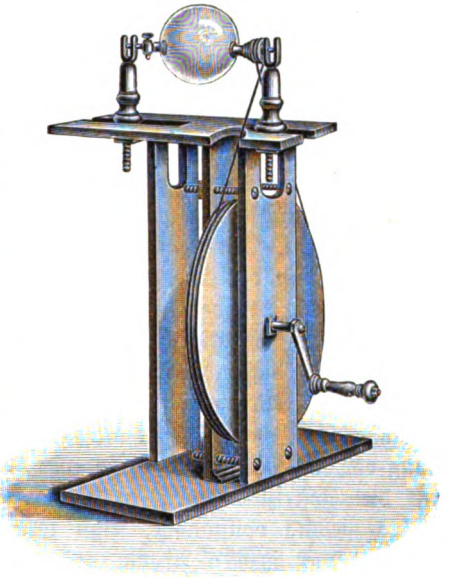
Dann folgt eine Untersuchung über die von Picard (I, § 271) erwähnte Erscheinung, daß die Torricellische Leere leuchtend wird, wenn das Barometer geschüttelt wird. Diese von Picard beobachtete Erscheinung hatte großes Aufsehen erregt und man hatte sie in verschiedener Weise zu erklären versucht. Hawksbee fand bei genauer Beobachtung, daß die Lichterscheinung um so stärker ist, je mehr Reibung zwischen dem Glase und dem Quecksilber

Digitized by Google

ſtattfindet. Dadurch kam er auf die Vermutung, daß die Erſcheinung elektriſcher Natur ſei und durch die Reibung hervorgerufen werde. Die Richtigkeit dieſer Vermutung bewies er durch den folgenden Verſuch.

Er befeſtigte eine hohle Glaskugel auf einer Drehlade ſo, daß ſie in ſchnelle Rotation geſetzt werden konnte (Fig. 200). Wenn er dann die Hand an die rotierende Kugel hielt, ſo wurde dieſe elektriſiert, und wenn dann die Luft aus der Kugel ausgepumpt wurde, ſo füllte ſie ſich mit Licht, welches Ähnlichkeit mit dem Licht hatte, welches beim Schütteln des Barometers in der Torricelliſchen Leere beobachtet wird.

Fig. 200.



Hawksbees leuchtende Kugel.

Auf die weiteren Unterſuchungen Hawksbees über das elektriſche Licht im luftverdünnten Raume wollen wir hier nicht eingehen. Später wird ſich Gelegenheit bieten, die weitere Entwickelung der Sache zu verfolgen.

Mit Hawksbee ſchließt die erſte — die Gilbert-Guerickeſche — Periode der Elektrizitätslehre ab. Gilbert hatte dieſen Teil der Phyſik begründet, und Guericke hatte ſo wichtige Tatſachen zutage gefördert, daß für weitere Forſchungen eine gute Grundlage geſchaffen war. Dennoch machte die Elektrizitätslehre zunächſt nur langſame Fortſchritte. Die elektriſche Kraft war äußerſt ſchwierig feſtzuhalten, ſo daß eine große Geſchicklichkeit im Experimentieren erforderlich war, wenn die Verſuche gelingen ſollten. Selbſt wenn die von Gilbert empfohlenen Vorſichtsmaßregeln beobachtet wurden, waren die Wirkungen doch ſchwach. Nur die elektriſche Lichterſcheinung war leicht zu beobachten.

§ 259. Der nächſte Abſchnitt der Geſchichte der Elektrizitätslehre beginnt mit einer Entdeckung Stephan Grays, eines Zeitgenoſſen Hawksbees. Auch über die Lebensverhältniſſe dieſes Gelehrten iſt wenig bekannt. Er war urſprünglich Optiker, und man weiß ſoviel, daß er ein fleißiger und nüchterner Forſcher war. Aus einer gelegentlichen Bemerkung ſeines Freundes Wheeler, der Geiſtlicher und ebenſo wie Gray Mitglied der Royal Society war, hat man geſchloſſen, daß er 1670 geboren und 1736 geſtorben iſt.

Gray begann ſeine elektriſchen Unterſuchungen 1729, indem er die gewöhnlichen Reibungsverſuche anſtellte. Zur Ausführung derſelben bediente er ſich eines Glasrohres von $2^1/_2$ Fuß Länge und 2 Zoll Weite. Er beobachtete zunächſt ebenſo wie Guericke die Anziehung, welche das geriebene Rohr auf

Digitized by Google

eine Flaumfeder ausübte. Die Öffnungen des Glasrohres hatte Gray, um den Staub abzuhalten, mit Korkstopfen verschlossen, und er beobachtete, daß die Korkstopfen elektrisch wurden, d. h. daß sie die Feder anzogen, wenn das Glas gerieben wurde. Der Kork gehörte aber nach Gilbert zu den „unelektrischen" Körpern. Dies veranlaßte Gray, weitere Beobachtungen über die Leitung der elektrischen Kraft anzustellen. Er steckte in den Kork ein Holzstäbchen und befestigte an dem anderen Ende dieses Stäbchens eine Elfenbeinkugel. Wurde nun das Glasrohr gerieben, so pflanzte sich die elektrische Kraft von dem Kork durch das Holzstäbchen bis zur Elfenbeinkugel fort. Dasselbe fand statt, wenn er das Holzstäbchen durch einen Metalldraht ersetzte. Auf diese Weise leitete er die Elektrizität durch einen 26 Fuß langen Metalldraht, der von einem Balkon herabhing.

Um eine noch längere Leitung zu bekommen, nahm Gray eine Hanfschnur, die durch einen von einem Nagel herabhängenden Faden schwebend gehalten wurde. Das eine Ende der Hanfschnur war mit dem Korkstopfen, das andere mit der Elfenbeinkugel verbunden. Jetzt erreichte die Elektrizität die Kugel nicht, sondern sie lief durch den Faden nach dem Nagel und verschwand. Die Leitung, in welcher sich die Elektrizität fortpflanzen sollte, durfte also in dieser Weise nicht aufgehängt werden.

§ 260. Kurz nachher war Gray bei seinem Freunde Wheeler zu Besuch, und er wollte diesen mit seinen Versuchen bekannt machen. Wheeler schlug vor, die Hanfschnur an seidenen Fäden aufzuhängen, indem er annahm, daß die Elektrizität durch so dünne Fäden nicht entweichen würde. Der Versuch gelang vollständig, selbst wenn die Hanfschnur 765 Fuß lang war und an einer großen Anzahl von Seidenfäden aufgehängt werden mußte. Die Elektrizität pflanzte sich bis an die Elfenbeinkugel fort, die mit dem Ende der Hanfschnur verbunden war. Bei einem dieser Versuche zerriß einer der Seidenfäden und wurde durch einen Metalldraht ersetzt. Jetzt pflanzte sich die Elektrizität nicht mehr bis zum Ende der Hanfschnur fort, sondern wurde durch den Metalldraht abgeleitet.

Gray und Wheeler untersuchten diese Erscheinungen eingehender und fanden, daß die Hanfschnur, der Seidenfaden und der Metalldraht ein sehr verschiedenes Verhalten zeigen. Die Hanfschnur leitet die Elektrizität gut, der Metalldraht noch besser als diese, der Seidenfaden dagegen gar nicht.

Bei seinen weiteren Untersuchungen fand Gray, daß es eine ganze Anzahl von Körpern gibt, die, wie die Hanfschnur und der Metalldraht, die Elektrizität gut leiten, aber anderseits auch eine Anzahl von Körpern, die wie die Seide die Elektrizität schlecht oder gar nicht leiten. Die Körper zerfielen also nach ihrem Verhalten in gute Leiter und schlechte Leiter der Elektrizität, und es zeigte sich, daß Gilberts „elektrische" Körper die schlechten Leiter und Gilberts „unelektrische" Körper die guten Leiter waren.

Gray unterschied allerdings Körper, die die Elektrizität leiten, und Körper, die die Elektrizität nicht leiten, allein Aepinus (§ 212) zeigte später, daß es Körper, die die Elektrizität gar nicht leiten, überhaupt nicht gibt.

Digitized by Google

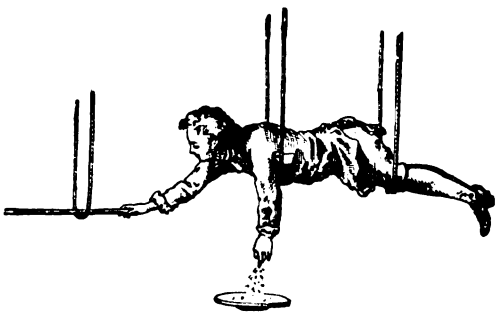
Wir wollen daher sogleich die Bezeichnungen „gute Leiter“ und „schlechte Leiter“ benutzen.

Zu den guten Leitern gehören die Metalle, Kohle, Salzlösungen, lebende Pflanzen- und Tierkörper, Leinen und Baumwolle.

Schlechte Leiter sind Bernstein, Harz, Schwefel, Schellack, Kautschuk, Ebonit, Wachs, Glas, Porzellan, Leder, Wolle, Seide, Federn, Haare (Pelz), Edelsteine, trockenes Holz, trockene Luft.

§ 261. Großes Aufsehen erregte Gray durch einen Versuch, aus dem hervorging, daß der menschliche Körper ein guter Leiter der Elektrizität ist. Fig. 201 ist ein altes Bild, durch welches dieser Versuch veranschaulicht wird. Ein Knabe hängt in zwei aus Haar geflochtenen Schnüren. Er berührt mit der einen Hand einen geriebenen Glasstab, und die Elektrizität pflanzt sich bis zur anderen Hand fort, welche auf Papierschnitzel anziehend wirkt.

Fig. 201.



Versuch von Gray.

Bei einem anderen Versuche wurde der Knabe auf einen Harzkuchen gestellt. Dieser verhinderte ebenso wie die Haarschnüre das Entweichen der Elektrizität aus dem Körper.

Nachdem man erkannt hatte, daß der menschliche Körper ein guter Leiter der Elektrizität ist, war es auch zu verstehen, weshalb Gilberts Einteilung der Körper in „elektrische“ und „unelektrische“ mit Grays Einteilung derselben in „gute Leiter“ und „schlechte Leiter“ zusammenfällt.

Gilberts „elektrische“ Körper waren solche, die elektrisch werden, d. h. Anziehungskraft annehmen, wenn sie gerieben werden. Nach Gray sind die „elektrischen“ Körper schlechte Leiter, d. h. die Elektrizität pflanzt sich in ihnen nicht (oder so gut wie nicht) fort. Entsteht nun in einem schlechten Leiter dadurch Elektrizität, daß er gerieben wird, so hält sich die Elektrizität in dem Körper und wird nur schwierig fortgeleitet, d. h. der Körper wird elektrisch.

Wenn dagegen in einem guten Leiter durch Reibung Elektrizität entsteht, so wird man, wenn nicht besondere Vorsichtsmaßregeln getroffen werden, von der Elektrizität nichts merken, da sie augenblicklich aus dem guten Leiter in die Körper übergeht, mit denen er in Berührung ist.

Später wurde nachgewiesen, daß alle Körper durch Reibung elektrisch gemacht werden können. Wenn man aber in dieser Weise einen guten Leiter, z. B. eine Metallplatte, elektrisch machen will, so muß man sie

Digitized by Google

an einem schlechten Leiter befestigen, so daß die in der Metallplatte entstehende Elektrizität nicht entweichen kann. Hält man die Platte mit der Hand, so wird die durch Reibung entstehende Elektrizität augenblicklich durch den Körper nach der Erde abgeleitet.

§ 262. Gray brachte die Elektrizitätslehre einen bedeutenden Schritt weiter. Er klärte nämlich die Bedingungen auf, unter denen sich die Elektrizität längere Zeit aufbewahren läßt, so daß man ihre Wirkungen genauer studieren kann. Mit Hilfe von seidenen Fäden und von Harzkuchen gelang es ihm, die Elektrizität in einem Körper 30 Tage lang aufzubewahren.

Gray machte auch noch eine andere wichtige Entdeckung. Er fand, daß es nicht nötig war, daß der Knabe (Fig. 201) den Glasstab berührte, um elektrisch zu werden. Wenn er seine Hand nur in die Nähe des geriebenen Glasstabes hielt, wurde er am ganzen Körper elektrisch. Die große Bedeutung dieser Entdeckung, die erst später ihre Erklärung fand, werden wir alsbald kennen lernen.

Von dem Wesen der Elektrizität machte sich Gray nur eine sehr unbestimmte Vorstellung. Er nennt die Elektrizität „etwas, was den ganzen elektrisierten Körper durchdringt, etwas, was alle Poren des Körpers erfüllt". Über die Frage, was die Elektrizität eigentlich sei, wurde damals und auch noch später viel spekuliert. Wir wollen auf diese Spekulationen nicht näher eingehen, sondern den von der Geschichte vorgezeichneten Weg gehen, auf dem sich etwas erreichen läßt. Dieser Weg besteht darin, daß man neue Erfahrungen über die Elektrizität sammelt.

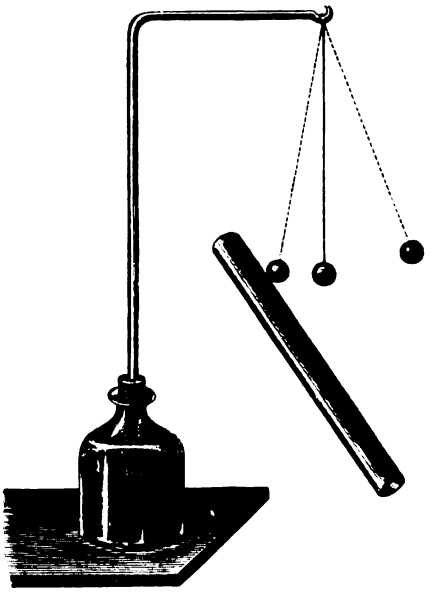
§ 263. Grays Arbeiten wurden in den Schriften der Royal Society veröffentlicht, welche damals in allen gelehrten Gesellschaften Europas gelesen wurden. Auf diese Weise wurden die Versuche Grays in den weitesten Kreisen bekannt und regten zu weiteren Untersuchungen an. Aber nur wenigen gelang es, neue Resultate zu erzielen. Zu diesen wenigen gehörte Charles François de Cisternay Dufay (1698 bis 1739). Nachdem er kurze Zeit dem Heere als Leutnant angehört hatte, verzichtete er auf die militärische Laufbahn und widmete sich dem Studium der Naturwissenschaften, namentlich der Chemie. Bereits 1723 wurde er Mitglied der Akademie und seit 1732 war er Intendant des botanischen Gartens. Bei seinen Untersuchungen über die Elektrizität beschäftigte er sich eingehend mit dem elektrischen Funken, über den Gray wenig sagt. Er elektrisierte einen Knaben, der auf einem Harzkuchen stand, und zog zum großen Erstaunen des Abtes Nollet (§ 267) elektrische Funken aus dem Knaben. Eine auf einem seidenen Kissen liegende Katze elektrisierte er durch Streichen mit der Hand so stark, daß sie Funken gab. Von größerer Bedeutung als diese Versuche über den elektrischen Funken waren jedoch zwei andere Entdeckungen, die Dufay machte. Die eine Erscheinung war bereits von Guericke beobachtet worden, daß nämlich ein elektrischer Körper auf einen unelektrischen erst anziehend, dann aber, nachdem sich die beiden Körper berührt haben, abstoßend wirkt. Nähert man einer Holundermarkkugel (Fig. 202), die an einem Seidenfaden

Digitized by Google

aufgehängt ist, einen geriebenen Glasstab, so wird die Holundermarkkugel erst angezogen, dann aber, nachdem sie den Glasstab berührt hat, abgestoßen. Auch Guericke hatte die Erscheinung beobachtet, aber nicht erklärt. Dufay gibt die folgende Erklärung: Alle elektrischen Körper ziehen alle unelektrischen an, berührt aber ein unelektrischer Körper einen elektrischen, so wird er selbst elektrisch und infolgedessen abgestoßen. Mit Hilfe dieses Satzes glaubte er viele merkwürdige Beobachtungen, die von anderen Forschern gemacht worden waren, erklären zu können. Eine wichtige Erweiterung erfuhr der Satz durch die andere Entdeckung, die Dufay machte.

Er wiederholte nämlich eines Tages Guerickes Versuch, einen leichten Körper (er benutzte ein Goldblatt) durch die Abstoßung eines elektrisierten Glasstabes schwebend zu halten. Er näherte dem Goldblatte ein durch Reibung elektrisch gemachtes Stück Harz und erwartete, daß auch dieses das Goldblatt abstoßen werde, da ja zwischen zwei elektrischen Körpern Abstoßung stattfindet. Aber es trat das Entgegengesetzte von dem, was er erwartet hatte, ein, das Harz zog das Goldblatt sehr kräftig an. Wie war dies mit den anderen Beobachtungen in Einklang zu bringen? Dufay fand bei seinen fortgesetzten Untersuchungen, daß allerdings alle elektrischen Körper alle unelektrischen anziehen, daß sich dagegen zwei elektrische Körper durchaus nicht immer abstoßen. Der Grund davon, sagt Dufay, ist der, „daß es zwei Arten von Elektrizität gibt, eine, die ich Glaselektrizität nennen will, und eine andere, die ich Harzelektrizität nennen will. Die erstere entsteht (durch Reibung) in Glas, Edelsteinen, Haar, Wolle u. s. w., die andere in Bernstein Harz, Seide u. s. w. Der wesentliche Unterschied der beiden Arten von Elektrizität besteht darin, daß jede von ihnen sich selbst abstößt, während die eine Art die andere anzieht".

Fig. 202.



Elektrisches Pendel.

§ 264. Daß es zwei Arten von Elektrizität gibt, läßt sich leicht durch den folgenden Versuch mit dem sogenannten elektrischen Pendel (Fig. 202) nachweisen. Man reibt zuerst einen Glasstab und nähert ihn der Holundermarkkugel. Diese wird angezogen, berührt den Glasstab, nimmt etwas von

Digitized by Google

der Elektrizität desselben auf und wird dann abgestoßen. Jetzt ist die Kugel mit Glaselektrizität „geladen". Entfernt man jetzt den Glasstab und nähert statt dessen einen geriebenen Harzstab, so wird die Kugel lebhaft angezogen. Sobald sie aber den Harzstab berührt hat, wird sie abgestoßen, weil sie nun die Harzelektrizität an Stelle der Glaselektrizität angenommen hat. Wird nun wieder der Glasstab angenähert, so zieht dieser die mit Harzelektrizität geladene Kugel an. *Gleichnamige Elektrizitäten stoßen sich ab, ungleichnamige Elektrizitäten ziehen sich an.*

Man kann nicht im voraus wissen, welche Art von Elektrizität ein Körper annimmt, wenn er mit einem anderen gerieben wird. Vermittelst eines Glasstabes und eines elektrischen Pendels ist es aber leicht zu entscheiden, ob er Glaselektrizität oder Harzelektrizität angenommen hat.

Mit Hilfe zweier elektrischer Pendel läßt sich auch leicht nachweisen, daß die Holundermarkkugel durch die Berührung mit dem geriebenen Glasstabe glaselektrisch wird. „Lädt" man nämlich zwei Pendelkugeln mit demselben Glasstabe, so stoßen sie sich einander ab. „Lädt" man sie mit demselben Harzstabe, so findet ebenfalls Abstoßung statt. „Lädt" man dagegen die eine Kugel mit Glaselektrizität und die andere mit Harzelektrizität, so ziehen sie sich gegenseitig an.

Trotzdem die Versuche *Dufays* leicht zu wiederholen waren und allgemein als richtig anerkannt wurden, fand seine Annahme, daß es zwei Arten von Elektrizität gebe, bei vielen Physikern Widerspruch. Auf den langjährigen Streit, ob es *eine* oder zwei Arten von Elektrizität gibt, werden wir später zurückkommen.

Gray hatte die Freude, mit *Dufays* Untersuchungen bekannt zu werden und er erkannte sie als einen großen Fortschritt an. Ein Mann, der durch seine Schriften und Vorlesungen viel dazu beigetragen hat, daß die Ergebnisse der Forschung dieser und anderer Gelehrten in weiteren Kreisen bekannt wurden, war *Jean Desagulier* (1683 bis 1744). Er war der Sohn eines evangelischen Geistlichen, der nach Aufhebung des Edikts von Nantes Frankreich verließ und nach England übersiedelte. Eine zeitlang war er Professor in Oxford, dann hielt er Vorlesungen in London und in Holland, später wurde er Geistlicher und zuletzt Kaplan des Prinzen von Wales. In der Elektrizitätslehre führte er die Bezeichnung **Konduktor** für Leiter ein. Sehr gut bezeichnete er den Unterschied zwischen einem guten und einem schlechten Leiter der Elektrizität. Berührt man einen guten Leiter, sagt er, so verliert dieser in demselben Augenblicke seine sämtliche Elektrizität. Berührt man dagegen einen schlechten Leiter, so verliert dieser nur die Elektrizität an der Berührungsstelle. Entsprechend dem Namen Konduktor hat man später für einen schlechten Leiter den Namen *Isolator* eingeführt.

§ 265. Die Elektrisiermaschine *Otto v. Guerickes* hat keine große Verbreitung gefunden. Die Untersuchungen *Grays* und *Dufays* brachten Leben in das Studium der Elektrizitätslehre an den Universitäten, und es machte sich das Bedürfnis geltend, bessere Apparate zur Erzeugung der

Digitized by Google

Elektrizität zu besitzen, als das seit Gilberts Zeit zu diesem Zwecke dienende Glasrohr.

Christian August Hausen, Professor der Physik in Leipzig, konstruierte 1743 auf den Rat seines Schülers Litzendorf eine Elektrisiermaschine, bei der die Guerickesche Schwefelkugel durch eine Glaskugel ersetzt war. — Professor Bose (1710 bis 1761) in Wittenberg schaffte sich eine derartige Glaskugelmaschine an und verbesserte sie bedeutend dadurch, daß er sie mit dem sogenannten Konduktor versah, einer Röhre aus Eisenblech, die von einer „isolierten", d. h. auf einem Harzkuchen stehenden oder an seidenen Schnüren hängenden Person gehalten wurde.

Am Konduktor befestigte er ein Bündel Drähte, die bis zur Kugel herabhingen und diese berührten, wenn sie durch Drehen und Berühren mit der Hand elektrisch gemacht wurde. Die Elektrizität ging dann von der Kugel durch die Drähte nach dem Konduktor, und es sammelte sich in diesem so viel Elektrizität an, daß man starke Funken aus ihm ziehen konnte. Bose erhielt so kräftige Funken aus dem Konduktor, daß sein Körper durch dieselben erschüttert wurde. Auch gelang es ihm, durch den elektrischen Funken Schießpulver zu entzünden, was Dufay ohne Erfolg versucht hatte.

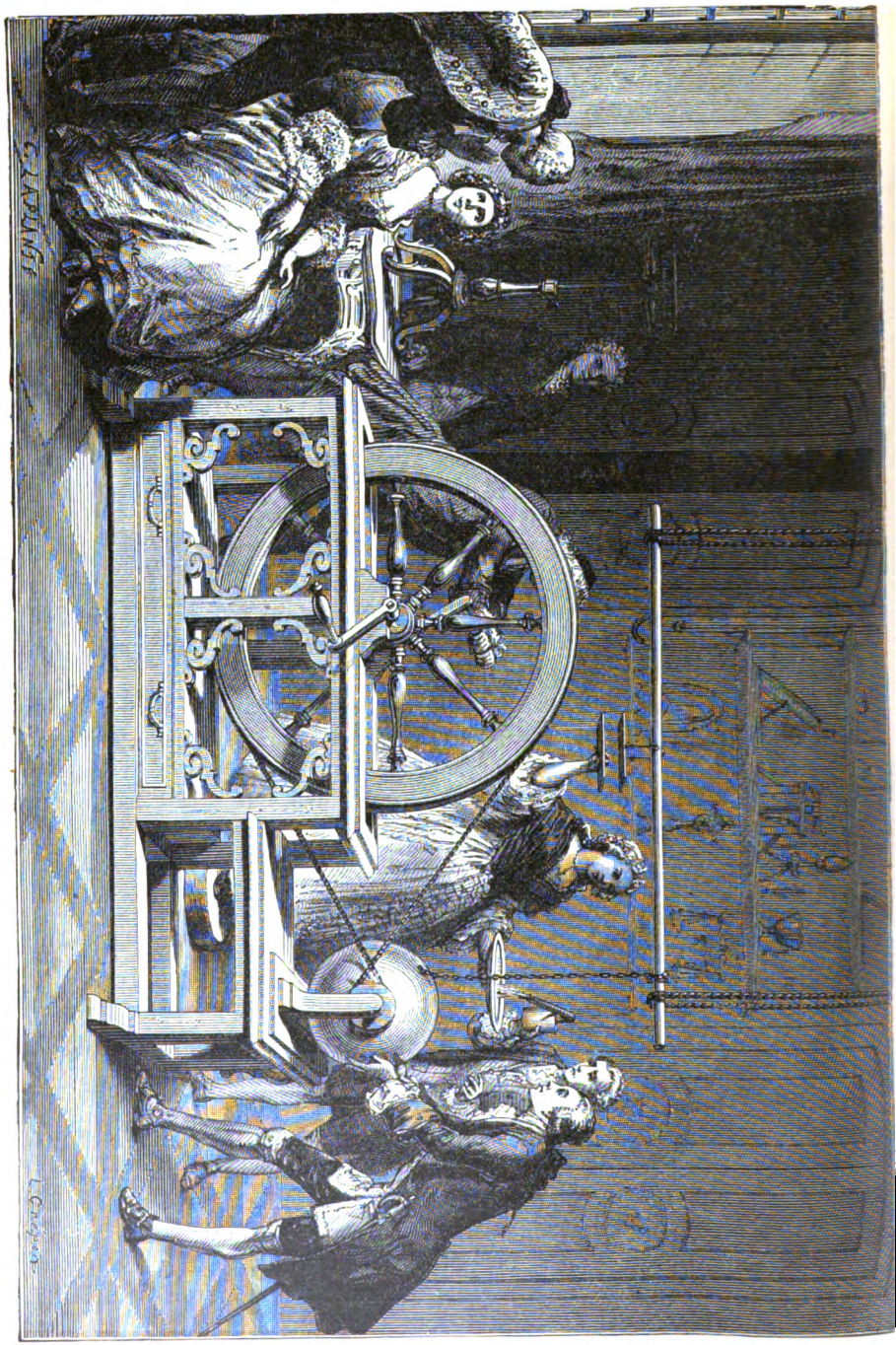
In Fig. 203 (a. f. S.) ist die Elektrisiermaschine des Abbé Nollet abgebildet, die im wesentlichen dieselbe Einrichtung hat wie die Bosesche Maschine. Die Glaskugel wird durch einen Schnurlauf gedreht und die Elektrizität wird durch eine Metallkette dem Konduktor zugeführt, welcher an seidenen Schnüren aufgehängt ist.

Eine bedeutende Verbesserung erfuhr die Elektrisiermaschine durch Professor J. H. Winckler (1703 bis 1770) in Leipzig, der das sogenannte „Reibzeug" einführte. Anstatt das Glas mit der Hand zu reiben, bewirkte er die Reibung durch zwei Lederkissen, die mit Pferdehaaren ausgestopft waren und durch Federn gegen das Glas gedrückt wurden. Durch dieses Reibzeug wurde die Maschine bedeutend stärker, und Winckler erhielt sehr kräftige elektrische Funken. So konnte er Weingeist durch einen Funken entzünden, den er mit dem Finger aus dem Konduktor zog.

Wir können die weitere Entwickelung der Elektrisiermaschine nicht im einzelnen verfolgen. Die Hauptteile derselben wurden in Deutschland erfunden, aber die zweckmäßigste Form und Beschaffenheit der einzelnen Teile hat sich aus der Erfahrung ergeben, welche sämtliche Physiker Europas in der letzten Hälfte des 17. Jahrhunderts durch zahllose Versuche mit ihren Maschinen gesammelt hatten.

Die Glaskugel wurde mit einem Glaszylinder und dieser wieder mit einer Glasscheibe vertauscht, die den Vorzug hatte, auf beiden Seiten gleichzeitig durch ein gabelförmiges Reibzeug gerieben werden zu können. Die von Boses Konduktor herabhängenden Drähte wurden durch eine Metallgabel ersetzt, zwischen deren Zinken sich die Scheibe bewegte. Die Zinken waren auf der der Scheibe zugewendeten Seite mit einer Anzahl von Spitzen besetzt. Die Spitzen führten die Elektrizität vom Glase in die Gabel über. Von

Digitized by Google



Elektrisiermaschine des Abbé Nollet.

Digitized by Google

dieser kam sie in den Konduktor, der in der Regel aus einem oder aus mehreren hohlen Messingzylindern bestand, die von einem Glasstabe getragen wurden.

Das Reibzeug spielt bei der Elektrisiermaschine eine wichtige Rolle, und es war ein bedeutender Fortschritt, als der englische Physiker John Canton (1718 bis 1772) die Anweisung gab, die Reibungskissen mit Zinnamalgam und Kreide zu bestreichen. Die Maschine gab mit solchen Reibungskissen bedeutend mehr Elektrizität als vorher. Heute benutzt man in der Regel ein Amalgam, welches 1788 von Franz von Kienmayer in Wien empfohlen wurde, und welches aus 2 Tln. Quecksilber und je 1 Tl. Zink und Zinn besteht.

Beim Gebrauch der Elektrisiermaschine machte man alsbald die Wahrnehmung, daß das Reibzeug in leitender Verbindung mit der Erde stehen muß, wenn die Maschine starke Funken geben soll. Dies erreichte man dadurch, daß man an das Metallstativ, an welchem das Reibzeug befestigt ist, eine Metallkette anhängte.

Ebenso erkannte man alsbald, daß das Glas zwar ein schlechter Leiter der Elektrizität, aber doch ein unzuverlässiger Isolator ist. Es ist nämlich hygroskopisch, d. h. es zieht die Feuchtigkeit aus der Luft an und überzieht sich mit einem Wasserhäutchen, was ein Entweichen der Elektrizität zur Folge hat. Daher ist es üblich, die Glasisolatoren mit einer dünnen Schicht Schellackfirnis zu überziehen. Es gibt übrigens auch Glasarten, die an und für sich schlechte Isolatoren sind.

In Fig. 204 (a. f. S.) ist eine ziemlich moderne Elektrisiermaschine abgebildet, die 1766 von dem Schwiegersohn John Dollonds, dem Optiker Jesse Ramsden (1735 bis 1800) konstruiert wurde. Die Reibung wird durch zwei Reibzeuge bewirkt, die in einem Metallstativ sitzen, von dem eine Kette auf den Fußboden herabhängt. Der mittlere Teil der Scheibe, welcher nicht gerieben wird, ist mit Firnis überzogen. Indem die Scheibe das Reibzeug passiert, wird sie elektrisch, und um das Ausströmen der Elektrizität zu verhindern, läßt man die Scheibe durch eine Art Futteral aus Seidentaft gehen, welches zwischen dem Reibzeug und den Spitzen angebracht ist. Diese ziehen die Elektrizität von der Scheibe auf den Konduktor, der von zwei auf Glassäulen ruhenden Zylindern gebildet wird. Die Ladung des Konduktors wird vermittelst des sogenannten Henleyschen Quadrantenelektrometers gemessen. Auf dem Konduktor ist ein kleines vertikales Metallstäbchen befestigt. Ein an diesem Stäbchen herabhängendes leichtes Pendelchen (ein Holzstäbchen oder ein Strohhalm mit einem Holundermarkkügelchen am unteren Ende) wird von dem Metallstäbchen um so stärker abgestoßen, je stärker der Konduktor geladen ist. Die Größe des Ausschlages kann an einem geteilten Halbkreise abgelesen werden. — Die genauere Erklärung der Wirkungsweise der Elektrisiermaschine wird später gegeben werden.

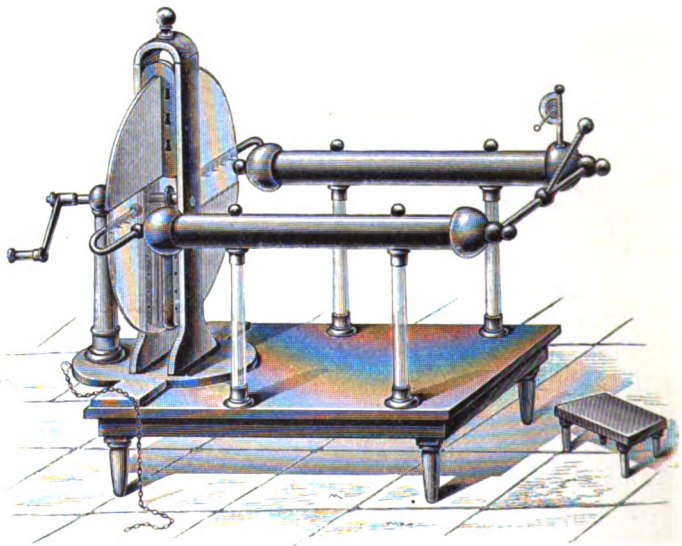
§ 266. Bereits im Jahre 1745 war eine Entdeckung gemacht worden, die für die Entwickelung der Elektrizitätslehre von großer Bedeutung werden

Digitized by Google

ſollte. Merkwürdigerweiſe wurde die Entdeckung faſt gleichzeitig in Pommern und in Holland gemacht.

In Pommern war der Entdecker der Domdechant E. G. v. Kleiſt in Kammin. Er ſteckte in ein Medizinglas, welches er in der Hand hielt, einen Nagel, näherte dieſen einem geladenen Konduktor und entfernte ihn dann wieder von dieſem. Als er dann den Nagel mit der anderen Hand berührte, erhielt er einen ſtarken elektriſchen Schlag. Weiter fand er, daß der Stoß bedeutend verſtärkt wurde, wenn er das Glas mit Spiritus oder mit Queckſilber füllte.

Fig. 204.



Elektriſiermaſchine von Ramsden.

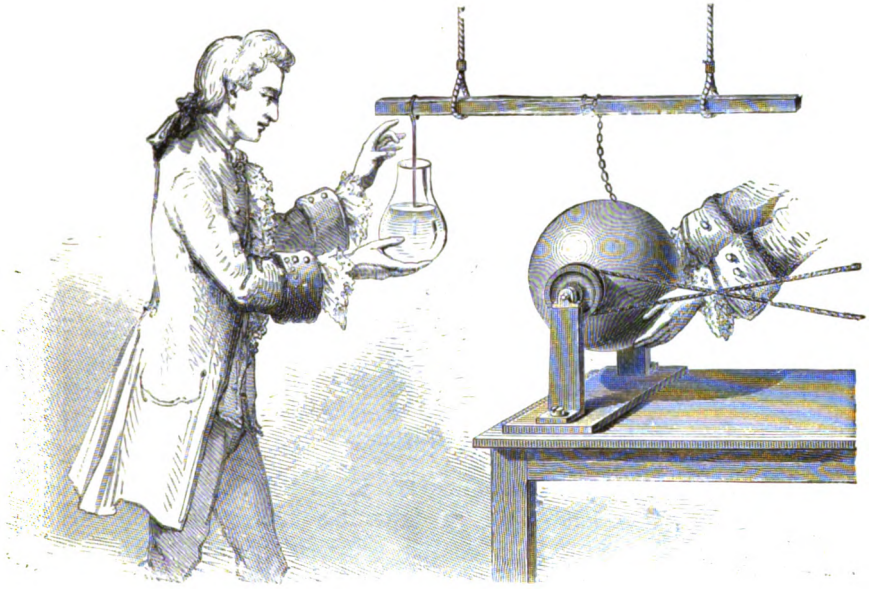
Kleiſt teilte ſeine Beobachtung einige Monate ſpäter (im Dezember 1745) dem Erzdiakon in Danzig mit, und dieſer ſetzte den Bürgermeiſter dieſer Stadt, Daniel Gralath, davon in Kenntnis, der kurz zuvor eine „Naturforſchende Geſellſchaft“ gegründet hatte. Gralath füllte eine Flaſche halb mit Waſſer, ſetzte ein eiſernes Stäbchen mit einer Flaſche am oberen Ende in die Flaſche und brachte die Kugel mit dem geladenen Konduktor einer Elektriſiermaſchine in Berührung. Hierdurch wurde die Flaſche „geladen“, und wie ſtark die Ladung war, zeigte Gralath in folgender Weiſe. Er ließ 20 Mann eine „Kette“ bilden, indem jeder von ihnen dem folgenden die Hand gab. Der erſte Mann hatte in der einen Hand die geladene Flaſche, und der letzte Mann der Kette hatte die eine Hand frei. Wenn er nun mit dieſer die Kugel auf dem eiſernen Stäbchen berührte, ſo erhielten ſämtliche 20 Mann einen elektriſchen Schlag. Dagegen gab es keinen Schlag, wenn der letzte Mann die Flaſche berührte, auch nicht, wenn ein Mann, der kein

Digitized by Google

Glied der Kette bildete, die Kugel des Eiſenſtäbchens berührte. — Gralath zog aus ſeinen Verſuchen den wichtigen Schluß, daß die „geladene“ Flaſche nur dann elektriſche Schläge gibt, wenn eine leitende Verbindung zwiſchen dem eiſernen Stäbchen und der äußeren Oberfläche hergeſtellt wurde.

§ 267. Wie ſich zu Anfang des Jahres 1746 herausſtellte, war dieſelbe merkwürdige Flaſche inzwiſchen auch in Leiden entdeckt worden, und zwar in dem Laboratorium des bekannten Profeſſors Pieter Muſſchenbroek (1692 bis 1761). Bei ſeinen elektriſchen Verſuchen ſtörte es ihn, daß die Elektrizität ſo ſchnell verſchwand, und er ſuchte das Entweichen derſelben dadurch zu verhindern, daß er ſie in einem Körper ſammelte, der von einem ſchlechten

Fig. 205.



Verſuch in Leiden.

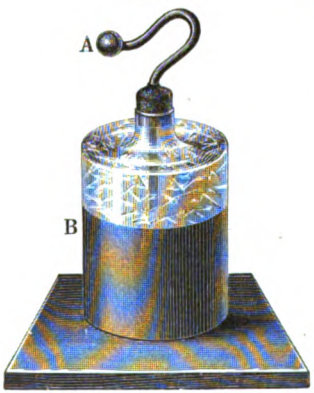
Leiter umgeben war. Er goß Waſſer in eine Flaſche und ſuchte die Elektrizität durch einen vom Konduktor herabhängenden Draht in das Waſſer einzuleiten, was jedoch nicht gelang. Eines Tages hielt Cunaeus, ein Bekannter Muſſchenbroeks, der ſich in deſſen Laboratorium mit phyſikaliſchen Verſuchen beſchäftigte, die Flaſche, in welche die Elektrizität eingeleitet wurde (Fig. 205), und als er zufällig den Zuleitungsdraht berührte, erhielt er einen ſtarken elektriſchen Schlag. Muſſchenbroek wiederholte den Verſuch und bekam einen ſo heftigen Schlag, daß er ſpäter an Réaumur ſchrieb, er möchte nicht noch einmal einen ſolchen Schlag erhalten, ſelbſt wenn er damit die Königskrone Frankreichs gewinnen könnte.

Digitized by Google

Von Leiden erhielt der bereits erwähnte Abbé Nollet Nachrichten über die Flaſche, und da er ſozuſagen mit der ganzen gelehrten Welt in Briefwechſel ſtand, wurde die Flaſche faſt überall unter dem Namen „Leidener Flaſche“ bekannt, während nur ſelten Kleiſt als Erfinder genannt wurde. Nollet (1700 bis 1770) war Mitglied der franzöſiſchen Akademie und übte in derſelben durch ſeinen ausgedehnten Briefwechſel einen großen Einfluß aus, was wir heutzutage kaum noch verſtehen, nachdem überall die Preſſe an die Stelle des wiſſenſchaftlichen Briefwechſels getreten iſt. Aber daß die elektriſche Flaſche allgemein Leidener Flaſche und nicht Kleiſtſche Flaſche genannt wird, iſt auf den Einfluß Nollets zurückzuführen.

§ 268. Eine Erklärung für die Wirkungsweiſe der Verſtärkungsflaſche hatte man nicht, aber ſie wurde viel benutzt, weil ſie kräftige Elektrizität gab.

Fig. 206.



Leidener Flaſche.

Fig. 207.

Auslader.

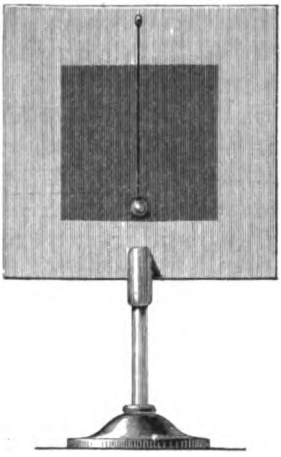
Man lernte auch ſehr ſchnell, wie ſie „geladen“ werden muß. Sowohl beim Kleiſtſchen als auch beim Muſſchenbroekſchen Verſuche wurde die Flaſche während des Ladens in der Hand gehalten. Tatſächlich muß auch die äußere Oberfläche der Flaſche mit der Erde leitend verbunden ſein, wenn ſie geladen werden ſoll. William Watſon (1715 bis 1787), Konſervator der phyſikaliſchen Sammlung der Royal Society, fand, daß ſich die Flaſche um ſo ſtärker laden läßt, je beſſer die äußere Oberfläche abgeleitet wird. Ein Dr. Bevis, Arzt in London, bekleidete die äußere Oberfläche der Flaſche mit Stanniol. Dann war die ganze Oberfläche abgeleitet, wenn nur ein Punkt derſelben mit der Hand berührt oder in anderer Weiſe mit der Erde in Verbindung gebracht wurde. Eine andere Verbeſſerung erfuhr die Flaſche durch Watſon, der auch die innere Oberfläche mit Stanniol bekleidete und am unteren Ende des Metallſtabes ein Metallkettchen befeſtigte, welches bis auf den Boden der Flaſche herabhing. Jetzt war auch die Flüſſigkeit entbehrlich, und die Flaſche hatte diejenige Einrichtung bekommen, die ſie im weſentlichen noch heute hat (Fig. 206). Weder die innere, noch die äußere Stanniolbelegung reicht bis an den Hals der Flaſche. — Wenn die Flaſche „entladen“ werden ſoll, ſo muß, wie Gralath nachgewieſen hatte, zwiſchen der äußeren und der inneren Belegung eine leitende Verbindung hergeſtellt werden. Dies kann in der Weiſe geſchehen, daß man die äußere Belegung mit der einen Hand und den Knopf auf der Spitze des Metallſtabes mit der

Digitized by Google

anderen Hand berührt. Wenn aber die Flasche stark geladen ist, wird der elektrische Schlag unangenehm, und man bewirkt dann zweckmäßig die Entladung der Flasche vermittelst eines sogenannten Ausladers (Fig. 207). Mit einer der beiden Kugeln *a* und *b* berührt man den Knopf, mit der anderen die äußere Belegung der Flasche, während man den Auslader an dem Glasgriff *m* anfaßt.

Der bereits genannte Dr. Bevis konstruierte noch einen anderen, einfacheren Ansammlungsapparat, die sogenannte Franklinsche Tafel. Sie besteht aus einer Glasscheibe, die auf beiden Seiten, aber nicht bis an den Rand, mit Stanniol belegt ist (Fig. 208). Um sie zu laden, bringt man die eine Belegung mit dem Konduktor der Elektrisiermaschine in leitende Verbindung, während man die andere Belegung ableitend berührt. Soll die Tafel entladen werden, so müssen ebenso wie bei der Flasche die beiden Belegungen miteinander durch einen Leiter verbunden werden.

Fig. 208.



Franklinsche Tafel.

§ 269. In der Leidener Flasche konnte man die Elektrizität lange Zeit aufbewahren. Man konnte die innere oder die äußere Belegung berühren, ohne irgend welche Wirkung zu verspüren. Ja, wenn man den Metallstab mit der Kette entfernte, die Flasche verkorkte, nach einiger Zeit den Metallstab wieder einsetzte und dann die beiden Belegungen durch einen Leiter verband, so zeigte es sich, daß die Flasche noch geladen war.

Le Monnier, Leibarzt Ludwigs XVI., machte eine Beobachtung, die für das Verständnis der Wirkung der Leidener Flasche von großer Bedeutung ist. Er beobachtete nämlich, daß die äußere Belegung der Flasche elektrisch wird und auf leichte Körper anziehend wirkt, wenn man die geladene Flasche auf eine isolierende Unterlage, z. B. einen Harzkuchen, stellt und dann den Knopf berührt. Le Monnier verfolgte jedoch die Sache nicht weiter. Erst Franklin gab die Erklärung für diese interessante Erscheinung.

§ 270. Benjamin Franklin war 1706 auf Governors-Island, einer kleinen Insel im Hafen von Boston, geboren. Sein Vater war englischer, seine Mutter holländischer Herkunft. Benjamin, der 16 Geschwister hatte, mußte frühzeitig seinem Vater, der Seifensieder war, im Geschäft behilflich sein und erhielt nur kurze Zeit regelrechten Unterricht. Im Alter von 12 Jahren kam er zu einem älteren Stiefbruder, der Buchdrucker und Zeitungsverleger war, in die Lehre. Die Gelegenheit zum Lesen, welche sich ihm hier bot, benutzte er fleißig. Seine schriftstellerische Tätigkeit begann er damit, daß er einen anonymen Artikel unter die Türe der Druckerei schob. Als dieser Artikel günstige Aufnahme fand, gab er sich seinem Bruder als Verfasser zu

Digitized by Google

erkennen. Da das Verhältnis zwischen ihm und seinem Stiefbruder kein gutes war, verließ er das Geschäft des letzteren und siedelte nach Philadelphia über, wo er Arbeit in einer Druckerei fand. Hier wurde der englische Gouverneur Keit auf den tüchtigen jungen Mann aufmerksam und veranlaßte ihn, eine zeitlang in England zuzubringen, um sich in seinem Fache gründlich auszubilden. Nach seiner Rückkehr errichtete er 1728 in Philadelphia eine eigene Druckerei und begann nun seine großartige Tätigkeit als Organisator in der jungen amerikanischen Gesellschaft.

§ 271. Bereits im Jahre 1727 hatte Franklin eine Gesellschaft begründet, die sich sowohl mit Politik, als auch mit Wissenschaften, namentlich Naturwissenschaften, beschäftigte. In diesem Kreise begann er 1745 seine elektrischen Untersuchungen. Durch Vermittelung von Peter Collinson in London, der Mitglied der Royal Society war, bekam er verschiedene elektrische Apparate, unter diesen auch eine Leidener Flasche. — Die Ergebnisse seiner Untersuchungen beschrieb er in einer Reihe von Briefen (1747 bis 1754) an Collinson, der sie in der Royal Society vorlesen ließ. Sie waren klar und unterhaltend geschrieben und wurden alsbald in verschiedene Sprachen übersetzt.

In dem zweiten Briefe (1747) stellte er eine Theorie der Elektrizität auf. Nach seiner Ansicht gibt es ein elektrisches Fluidum, welches alle Körper durchdringt. Die Teilchen des elektrischen Fluidums stoßen sich einander ab, werden aber von den Teilchen des Körpers angezogen. — Wenn ein Körper so viel elektrischen „Stoff" enthält, als er aufnehmen kann, ohne daß sich etwas von dem Stoff an der Oberfläche des Körpers anhäuft, so ist der Körper unelektrisch. Kommt ein Überschuß von Elektrizität zustande, so wird der Körper positiv elektrisch (d. h. glaselektrisch), verliert dagegen der Körper etwas von seinem „natürlichen" Elektrizitätsinhalt, so wird er negativ elektrisch, d. h. harzelektrisch. Franklin nahm also nicht zwei Arten von Elektrizität, sondern zwei elektrische Zustände an, von denen der eine durch einen zu großen, der andere durch einen zu kleinen Inhalt von Elektrizität erzeugt wird. Ein Körper kann also dadurch elektrisiert werden, daß ihm Elektrizität zugeführt wird, aber auch dadurch, daß ihm Elektrizität entzogen wird. Die Erregung der Elektrizität durch Reibung ist nach dieser Theorie so aufzufassen, daß während der Reibung Elektrizität von dem einen Körper zu dem anderen übergeht, so daß der eine positiv elektrisch und der andere negativ elektrisch wird.

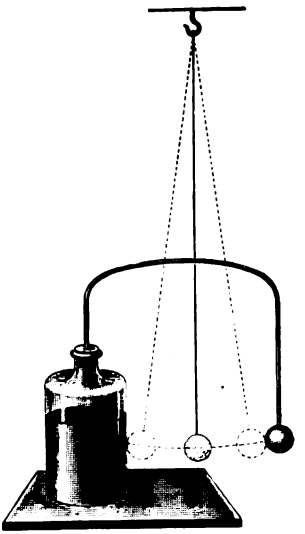
Wir wollen von jetzt an die Franklinschen Benennungen „positive" und „negative" Elektrizität statt Glaselektrizität und Harzelektrizität gebrauchen. Sie haben den Vorzug, daß sie andeuten, daß sich die beiden Dinge, die sie bezeichnen, wie eine positive und negative Zahl aufheben können. Es war für Franklin übrigens nicht leicht, die Versuche Dufays mit Hilfe seiner Theorie zu erklären. Daß ein positiv elektrischer Körper einen anderen positiv elektrischen abstößt, erklärte er dadurch, daß sich die Teilchen des elektrischen Fluidums gegenseitig abstoßen. Auch die Anziehung zwischen einem positiv elektrischen und einem negativ elektrischen Körper ließ sich noch einigermaßen

Digitized by Google

erklären, indem man sagte, der „natürliche“ Zustand suche sich wiederherzustellen, was dadurch geschieht, daß der Körper, der zu viel Elektrizität enthält, etwas an denjenigen Körper abgibt, der zu wenig enthält. In ähnlicher Weise läßt sich auch die Anziehung zwischen einem elektrischen und einem unelektrischen Körper erklären. Der Grund liegt darin, daß sich die Elektrizität in den beiden Körpern gleichmäßig zu verteilen sucht. Der „natürliche“ Zustand sucht sich soweit wie möglich herzustellen. Aber schwer zu erklären war es, weshalb sich zwei negativ elektrische Körper abstoßen. Franklin half sich mit der Annahme, daß sich die Teilchen der Körper selbst abstoßen, wenn sie nicht den normalen Inhalt an Elektrizität besitzen. Diese Erklärung ist aber sehr künstlich und sie leidet an demselben Fehler, wie die entsprechende Erklärung von Aepinus (§ 212) hinsichtlich des Magnetismus, d. h. es ist nicht möglich, ihre Richtigkeit durch den Versuch zu bestätigen.

§ 272. Franklins Theorie der Elektrizität wurde von den Physikern der Alten Welt günstig aufgenommen, aber es war doch hauptsächlich die Erklärung der Leidener Flasche, durch die der Name Franklins überall in den wissenschaftlichen Kreisen Europas bekannt wurde. Er fand, daß die äußere und die innere Belegung der Flasche mit entgegengesetzten Elektrizitäten geladen sind. Dies konnte er mit dem elektrischen Pendel nachweisen, allein er konstruierte einen besonderen Apparat zur Veranschaulichung des Zustandes, in welchem sich die Belegungen einer geladenen Leidener Flasche befinden. Der Metallstab der in Fig. 209 abgebildeten Flasche ist umgebogen und am Ende mit einer Messingkugel versehen. Diese Kugel enthält also dieselbe Elektrizität wie die innere Belegung der Flasche. Ein an einem seidenen Faden aufgehängtes Holundermarkkügelchen wird der Messingkugel angenähert. Es wird von der Kugel angezogen, nach der Berührung abgestoßen, aber von der äußeren Belegung der Flasche angezogen. Nach der Berührung wird es von dieser abgestoßen, dagegen wieder von der Kugel angezogen u. s. w. Das Holundermarkkügelchen schwingt zwischen der Messingkugel (die mit der inneren Belegung in Verbindung steht) und der äußeren Belegung hin und her und überträgt bei jeder Schwingung etwas Elektrizität von der einen Belegung auf die andere. Die Flasche wird auf diese Weise nach und nach entladen. Selbstverständlich bleibt das Pendel stehen, sobald auf den beiden Belegungen kein elektrischer Unterschied mehr besteht.

Fig. 209.



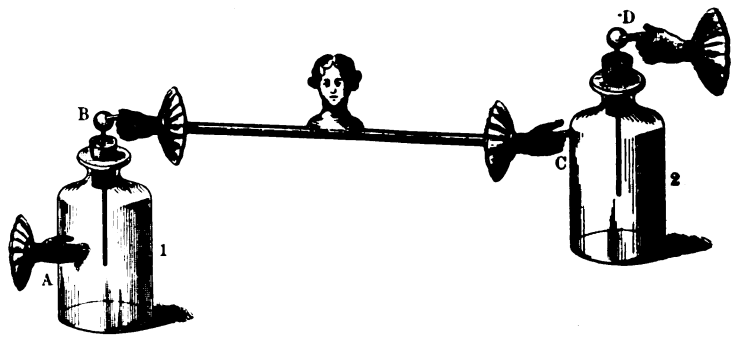
Franklins Versuch mit der Leidener Flasche.

Den Vorgang der Ladung der Flasche erklärt Franklin in folgender

Digitized by Google

Weise. Wenn die innere Belegung mit einem positiv geladenen Konduktor in Verbindung gesetzt wird, so strömt die Elektrizität in die Flasche über. Hierdurch erleidet der elektrische Zustand der äußeren Belegung eine Veränderung. Die positive Elektrizität auf der Innenseite des Glases wirkt nämlich abstoßend auf die Elektrizität der äußeren Belegung. (Man erinnere sich, daß die Flasche ableitend berührt werden muß, wenn sie geladen werden soll.) Die Belegung der Außenseite des Glases wird also negativ elektrisch, und Franklin behauptete, die negative Elektrizität der äußeren Belegung sei der Menge nach ebenso groß wie die der inneren Belegung zugeführte Elektrizität. Die Gesamtmenge der Elektrizität, die in der Flasche enthalten ist, ist also vor und nach der Ladung genau dieselbe. Die Ladung besteht nur darin, daß die eine Belegung mehr und die andere weniger Elektrizität bekommt, als sie im unelektrischen Zustande enthält. Die beiden Elektrizitäten können der Anziehung, die sie aufeinander ausüben, nicht nachgeben und sich vereinigen, weil es durch das Glas, d. h. einen schlechten Leiter, verhindert wird. Aber die Anziehung ruft eine elektrische „Spannung" hervor, die ununterbrochen vorhanden ist und die die entgegengesetzten Elektrizitäten zusammentreibt, sobald zwischen den beiden Belegungen eine Leitung hergestellt wird. —

Fig. 210.



Entladung einer Leidener Flasche in eine andere.

Franklin lud die Flasche auch „umgekehrt", d. h. er stellte sie auf einen Harzkuchen und ließ die Elektrizität von einem positiv elektrischen Konduktor auf die äußere Belegung übergehen, während er den Knopf, der mit der inneren Belegung in Verbindung stand, mit dem Finger berührte. Jetzt wurde die äußere Belegung positiv und die innere negativ elektrisch.

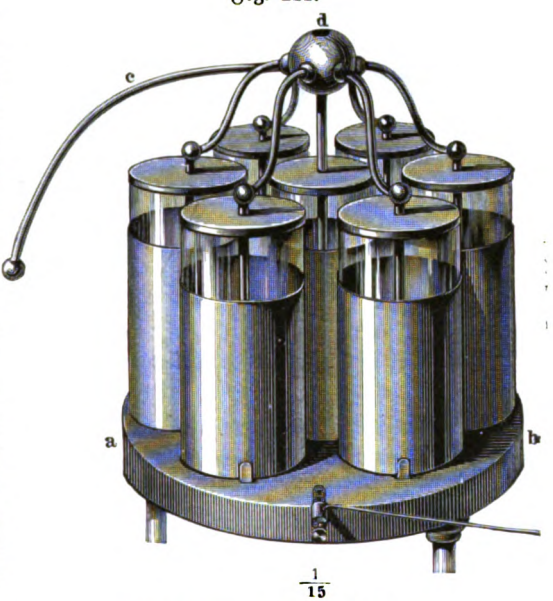
In einem seiner Briefe an Collinson erklärt Franklin, wie sich die Ladung einer Leidener Flasche in eine andere überführen läßt, und er erläutert dies durch Fig. 210. Die Flaschen 1 und 2 sind beide geladen. Eine Person berührt die äußere Belegung von 1, eine andere Person den Knopf von 2. Wenn nun eine dritte Person, die isoliert steht, zwischen der inneren Belegung von 1 und der äußeren Belegung von 2 eine leitende Verbindung herstellt, so werden die beiden Flaschen entladen. Die positive Elektrizität

Digitized by Google

von 1 ist also auf die äußere Belegung von 2 übertragen, die negative Elektrizität enthielt. Auch dieser Versuch bildete einen Beweis dafür, daß die beiden Belegungen der Leidener Flasche verschiedenartige Elektrizität enthalten.

§ 273. Die Elektrizitätsmenge, welche aus einem geladenen Konduktor in eine Leidener Flasche übergehen kann, ist natürlich um so größer, je größer die Metallbelegung der Flasche ist. Will man eine sehr große Metallfläche haben, so benutzt man zweckmäßigerweise anstatt einer einzigen großen Flasche eine größere Anzahl kleinerer Flaschen, die zu einer sogenannten Batterie zusammengestellt sind (Fig. 211). Sowohl Gralath, als Winckler benutzten derartige Batterien. Die Flaschen stehen auf einer Metallplatte, die zur Erde abgeleitet ist, und alle inneren Belegungen sind durch Metallstäbe verbunden, die mit dem Konduktor der Maschine in Verbindung stehen. Alle Flaschen werden gleichzeitig geladen. Ebenso werden sie gleichzeitig entladen, sobald zwischen den inneren und den äußeren Belegungen eine leitende Verbindung hergestellt wird.

Fig. 211.



$\frac{1}{15}$

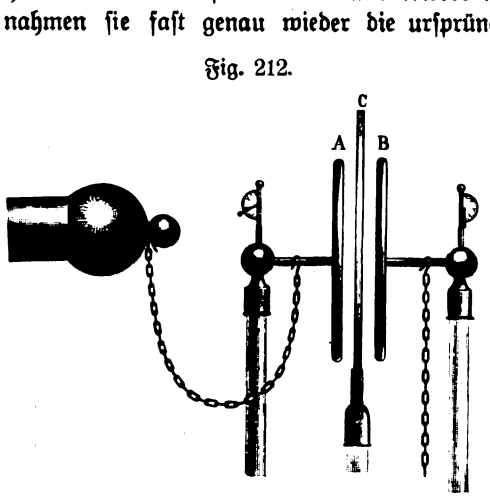
Batterie von Leidener Flaschen.

Die Glaswand der Leidener Flasche hat, wie gesagt, die Aufgabe, die Vereinigung der Elektrizitäten in den beiden Belegungen zu verhindern. Bei starker Ladung kann aber die Spannung zwischen den beiden Belegungen so groß werden, daß die Elektrizitäten durch die Glaswand hindurchschlagen und diese zertrümmern. Die Glaswand spielt aber, wie Franklin entdeckte, noch eine andere Rolle. In Fig. 212 (a. f. S.) ist eine Ladungstafel abgebildet, die so eingerichtet ist, daß die Belegungen A und B, die an Glasstäben befestigt sind, von der Glasscheibe C entfernt werden können. Mit einer solchen Ladungstafel führte Franklin den folgenden Versuch aus. Während die Belegungen A und B die Glasscheibe berührten, wurde A vom Konduktor einer Maschine positiv geladen und B durch eine Metallkette nach der Erde abgeleitet. Nachdem die Tafel geladen war, wurde die Verbindung von A mit dem Konduktor und ebenso die Verbindung von B mit der Erde unterbrochen. Wenn nun die Belegungen A und B von C entfernt wurden,

Digitized by Google

so zeigte es sich, daß sie nur eine äußerst geringe Menge Elektrizität enthielten. Wurden sie entladen und wieder mit *C* in Berührung gebracht, so nahmen sie fast genau wieder die ursprüngliche Spannung an. Franklin zog hieraus den Schluß, daß die Elektrizität hauptsächlich auf der Oberfläche des Glases sitzt, wo sie durch die gegenseitige Anziehung festgehalten wird. Zugleich sprach er die Ansicht aus, daß es auch von der Beschaffenheit des Glases abhängt, bis zu welchem Grade die Elektrizität auf den beiden Seiten desselben „gespannt" werden kann.

Fig. 212.



Ladungstafel mit beweglichen Belegungen.

§ 274. J. H. Winckler hatte einen eigentümlichen Begriff, die „elektrische Atmosphäre", eingeführt. Er stellte sich die Elektrizität als einen äußerst feinen ätherischen Stoff vor. Wenn ein Körper durch Reibung elektrisch gemacht wird, so besteht der Vorgang nach seiner Ansicht darin, daß der Körper in eine elektrische Atmosphäre eingehüllt wird, indem die Reibung bewirkt, daß sich die Elektrizitätsteilchen von den Teilchen des Körpers selbst trennen.

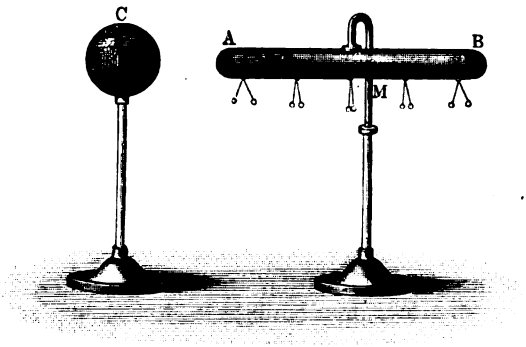
Man mußte natürlich von einer positiven und auch von einer negativen „elektrischen Atmosphäre" sprechen, da man sowohl positiv elektrische als auch negativ elektrische Körper kannte. Merkwürdigerweise benutzte auch Franklin diese Vorstellung von den elektrischen Atmosphären, obwohl sie zu seiner Auffassung der negativen Elektrizität schlecht paßte. — Allein John Canton, Mitglied der Royal Society (§ 266), wies durch eine Reihe von Versuchen nach, daß die Annahme dieser „elektrischen Atmosphäre" unhaltbar ist. Er beobachtete, daß blankes Glas positiv elektrisch, mattgeschliffenes Glas dagegen negativ elektrisch wird, wenn es mit Flanell gerieben wird. Es wäre aber sehr wunderbar, wenn beim Reiben des blanken Glases die positive und beim Reiben des matten Glases die negative Atmosphäre zum Vorschein kommen sollte.

Eine andere Entdeckung, die er machte, war noch schwieriger mit dem Begriff der elektrischen Atmosphäre in Einklang zu bringen. Er näherte eine positiv elektrische Kugel *C* (Fig. 213) einem Metallzylinder *AB*, der durch einen Glasfuß isoliert war. Die an dem Zylinder hängenden Pendelchen gingen auseinander, ein Zeichen, daß der Zylinder infolge der Annäherung der elektrischen Kugel ebenfalls elektrisch wurde. Bei näherer Untersuchung zeigte es sich, daß der Metallzylinder bei *A* negativ elektrisch und bei *B* positiv

Digitized by Google

elektrisch war. Also mußte der Zylinder an dem einen Ende eine positive, am anderen Ende eine negative Atmosphäre um sich haben. Dies war nach Cantons Ansicht eine zu künstliche Erklärung. Er selbst konnte jedoch ebensowenig wie Franklin die Erscheinung in anderer Weise erklären.

Fig. 213.

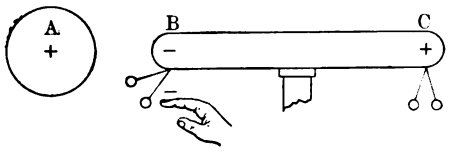


Versuch von Canton.

J. C. Wilcke (§ 51) wiederholte die Versuche Cantons und beschrieb sie genauer. Auch veranlaßte er seinen Freund Aepinus (§ 212), sich mit der Sache zu beschäftigen. Dieser war ein Anhänger von Franklins Theorie und er erklärte mit Hilfe derselben die Entdeckung Cantons. Wenn die positiv elektrische Kugel C dem Zylinder AB genähert wird, so wird die Elektrizität, welche den natürlichen Inhalt von AB bildet, nach B hin abgestoßen. Das Ende B des Zylinders wird also positiv elektrisch, und das Ende A, von dem die Elektrizität hinweggetrieben wird, negativ elektrisch. In der Mitte von AB, wo der Übergang von der positiven zu der negativen Elektrizität stattfindet, wirkt keine elektrische Kraft und die Pendelchen schlagen nicht aus. (Fig. 213). Die Stärke der Elektrizität nimmt von den Enden nach der Mitte hin ab. Wenn die elektrische Kugel C entfernt wird, so fließen die positive und die negative Elektrizität zusammen und AB ist unelektrisch.

Aepinus bewies die Richtigkeit seiner Erklärung durch den folgenden Versuch. Die positiv elektrische Kugel A (Fig. 214) wird dem Zylinder BC genähert, der infolgedessen am Ende B negativ elektrisch und am Ende C positiv elektrisch wird. Berührt man nun BC irgendwo mit dem Finger, so wird die positive Elektrizität durch den Körper nach der Erde abgeleitet. Zieht man jetzt den Finger zurück, und entfernt dann A, so ist BC überall negativ elektrisch. Dies steht mit der Theorie in Einklang. Die positive Elektrizität ist fortgetrieben, also muß der Körper negativ elektrisch sein. — Hier ist ein Körper elektrisch geworden, ohne gerieben worden und ohne mit einem elektrischen Körper in Berührung gekommen zu sein. Eine solche Art der Elektrisierung nennt man mit Rücksicht auf die Symmersche Theorie (vgl. den folgenden § 275) Elektrisierung durch Verteilung.

Fig. 214.



Elektrisierung durch Verteilung.

§ 275. Im Jahre 1759 erschien in den „Philosophical Transactions“

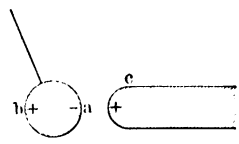
Digitized by Google

eine Reihe von Abhandlungen über „die beiden elektrischen Kräfte“. Der Verfasser, Robert Symmer (gest. 1763), nahm in diesen Abhandlungen die Dufaysche Theorie, daß es zwei Arten von Elektrizität gibt, von neuem auf. Symmer hatte die Gewohnheit, zwei Paar seidene Strümpfe, ein schwarzes und ein weißes, übereinander zu tragen. Als er eines Abends im Dunkeln das äußere Paar auszog, beobachtete er das Auftreten elektrischer Funken, welches von einem knisternden Geräusch begleitet war. Die abgezogenen Strümpfe waren wie aufgeblasen, so daß man sie aufrecht auf einen Stuhl stellen konnte. Wenn man sie gegenseitig annäherte, stießen sie sich stark ab. Symmer wiederholte den Vorgang mit zwei gleichfarbigen Strümpfen, aber diese wurden nicht elektrisch. Die Verschiedenheit der Farbe (die schwarze Farbe war durch Galläpfel und Eisenvitriol erzeugt) spielte also bei dem Vorgang eine wesentliche Rolle.

Symmer kam durch diese Beobachtung zu der Annahme, daß die Körper im natürlichen (d. h. im unelektrischen) Zustande beide Arten der Elektrizität in gleicher Menge enthalten. Wenn aber zwei Körper aneinander gerieben werden, so geht die positive Elektrizität in den einen und die negative Elektrizität in den anderen Körper über, und zwar treten von jeder Art gleiche Mengen auf. Durch diese Annahme finden auch die von Canton und Aepinus beobachteten Verteilungserscheinungen eine sehr einfache Erklärung. Wenn der positiv elektrische Körper A (Fig. 214) dem unelektrischen Konduktor BC genähert wird, so zieht A die negative Elektrizität an und stößt die positive Elektrizität ab. Die erstere sammelt sich also am Ende B, die letztere am Ende C an. Wird A entfernt, so vereinigen sich die beiden Elektrizitäten wieder und BC wird unelektrisch. Wenn dagegen BC ableitend berührt wird, während A noch angenähert ist, so strömt die positive Elektrizität ab und es bleibt negative Elektrizität in BC zurück. Wird jetzt die Berührung aufgehoben und dann A entfernt, so ist BC mit negativer Elektrizität geladen. BC ist durch Verteilung geladen.

Daß ein Körper, der gleiche Mengen positiver und negativer Elektrizität in gleichmäßiger Mischung enthält, keine elektrische Kraft ausübt, erklärt Symmer in folgender Weise. Es sei c (Fig. 215) ein positiv elektrischer Körper. Wenn dieser Körper auf ein Holundermarkkügelchen anziehend wirkt, so ist in diesem die Elektrizität verteilt. Die dem Körper c zugewendete Seite ist negativ, die abgewendete positiv elektrisch, und selbstverständlich ist die Anziehung zwischen c und a größer als die Abstoßung zwischen c und b. Das Kügelchen wird also nach c hingezogen. Enthielte dagegen jeder Teil von c anstatt positiver Elektrizität eine ebenso große Menge negativer Elektrizität, so würde die Verteilung in dem Kügelchen die entgegengesetzte sein; nach a würde positive und nach b negative Elektrizität kommen. Hat c positive und negative Elektrizität in gleicher Menge und in gleichmäßiger Mischung, so bleibt das Kügelchen offenbar

Fig. 215.



Symmers Erklärung.

Digitized by Google

unelektrisch, d. h. es findet in demselben keine Verteilung der Elektrizitäten statt.

Die Elektrisierung durch Mitteilung nimmt sich nach der Symmerschen Theorie etwas anders aus als nach der Franklinschen Theorie. Nach der ersteren geht während der Berührung etwas positive Elektrizität von *c* auf das Kügelchen über, nach der letzteren dagegen findet das Entgegengesetzte statt. Von dem Kügelchen geht negative Elektrizität auf *c* über und positive Elektrizität bleibt zurück.

§ 276. Es könnte vielleicht scheinen, daß die sog. dualistische Theorie Symmers nicht so einfach sei wie die unitarische Theorie Franklins. Aber in Wirklichkeit bietet die letztere bei der Erklärung der elektrischen Erscheinungen mehr Schwierigkeiten als die erstere. Nach der Franklinschen Theorie ist es, wie man sich erinnern wird, nicht leicht zu erklären, weshalb sich negativ elektrische Körper abstoßen. Nach der Symmerschen Theorie stoßen sich negativ elektrische Körper aus demselben Grunde ab wie positiv elektrische, wenn man die Versuchsresultate Dufays einfach in den Satz zusammenfaßt: Gleichartige Elektrizitäten stoßen sich ab, ungleichartige Elektrizitäten ziehen sich an.

Franklin selbst machte eine Entdeckung, die eine starke Stütze für die Symmersche Theorie bildete und die verschiedene Physiker, z. B. den erwähnten J. C. Wilcke, veranlaßte, die unitarische Theorie zu verlassen und sich der dualistischen zuzuwenden.

Die Entdeckung Franklins betraf die Wirkung von Spitzen, welche auf den Konduktor gesetzt oder demselben entgegengehalten werden. Wenn eine spitze Metallnadel auf einen geladenen Konduktor gesetzt wird, so strömt die Elektrizität durch die Spitze aus; der Konduktor wird entladen. Richtet man eine spitze Metallnadel gegen den geladenen Konduktor, so zieht sie selbst aus beträchtlicher Entfernung die Elektrizität aus dem Konduktor. — Franklin entlud in dieser Weise vermittelst einer Stricknadel einen Konduktor aus einer Entfernung von einem Fuß. Wilcke untersuchte die Erscheinung sehr sorgfältig und fand, daß bei dieser Art der Entladung von der Spitze ein Luftstrom ausgeht, durch den die Elektrizität hinweggeführt wird. Wenn ein Konduktor hinreichend stark geladen ist, einerlei ob mit positiver oder mit negativer Elektrizität, so geht von der Spitze ein so kräftiger Luftstrom aus, daß man vermittelst desselben eine Kerzenflamme ausblasen kann (Fig. 216). Ein Apparat, der sich durch diesen sog. „elektrischen Wind" in ähnlicher Weise in Bewegung setzen läßt, wie Herons Äolipile (§ 56) durch Dampf, ist das in Fig. 217 (a. f. S.) abgebildete elektrische Flugrad. Die Einrichtung desselben ist ohne weitere Beschreibung aus der Figur ersichtlich. Der elektrische Wind entsteht dadurch, daß die mit der Spitze in

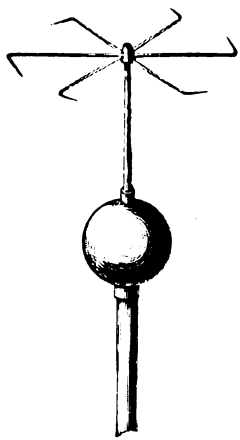
Fig. 216.

Wirkung der Spitzen.

Digitized by Google

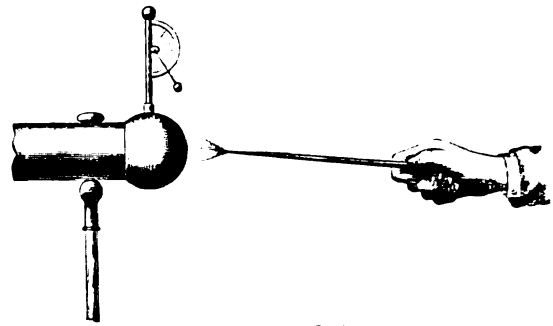
Berührung kommenden Luftteilchen (oder die in der Luft schwebenden Staubteilchen) elektrisiert und dann von der Spitze abgestoßen werden. Wenn Wilcke die Versuche in einem dunkeln Zimmer anstellte, so beobachtete er, daß das Ausströmen der Elektrizität mit einer Lichterscheinung verbunden war, indem aus der Spitze, durch die die Elektrizität ausströmte, ein Lichtbüschel hervortrat. Diese Erscheinungen waren nach Wilckes Ansicht schwer mit der Franklinschen Theorie zu vereinbaren. Nach dieser Theorie hätte nämlich nur ein positiv geladener Konduktor Elektrizität ausströmen, ein negativ geladener dagegen hätte Elektrizität einsaugen müssen. Wilcke ging daher zur Symmerschen Theorie über, und verschiedene andere Physiker folgten seinem Beispiel.

Fig. 217.



Elektrisches Flugrad.

Fig. 218.



Wirkung der Spitzen.

Übrigens läßt sich das Ausströmen der negativen Elektrizität aus Spitzen auch mit Hilfe der Franklinschen Theorie erklären. Die negativ elektrische Spitze zieht nämlich die Luftteilchen an, diese geben einen Teil ihrer Elektrizität an die Spitze ab, werden dann abgestoßen und strömen mit negativer Elektrizität, d. h. mit einem Mangel an Elektrizität fort. — Die unitarische Theorie wurde daher durch die Erscheinungen der Spitzenwirkung nicht beseitigt. Ob es zwei elektrische Fluida oder nur ein elektrisches Fluidum gibt, ist auch heute noch nicht entschieden. Beide Theorien sind ja übrigens nur Hilfsmittel, die es uns ermöglichen, den Gang der Erscheinungen in Worte zu fassen. Keine von beiden kann behaupten, eine wirkliche Erklärung der Erscheinungen zu geben. Wir wollen uns im Folgenden der Bezeichnungsweise der dualistischen Theorie bedienen.

§ 277. Franklins Entdeckung, daß man vermittelst eines zugespitzten Metallstäbchens einem geladenen Konduktor selbst aus größerer Entfernung die Elektrizität entziehen kann, ist leicht zu erklären. Der Konduktor (Fig. 218) verteilt nämlich die Elektrizität in dem spitzen Körper, und wenn der Konduktor positiv elektrisch ist, so strömt aus der Spitze negative Elektrizität auf den Konduktor aus. Dieser wird daher ganz oder teilweise unelektrisch.

Digitized by Google

Die Beobachtungen über die Wirkung der Spitzen stehen im engsten Zusammenhang mit der berühmtesten Erfindung Franklins, der Erfindung des Blitzableiters.

Bereits Dr. Wall (§ 258) hatte die Vermutung ausgesprochen, daß der Blitz ein starker elektrischer Funke sei, und später hatte Winckler mit der größten Bestimmtheit behauptet, daß der Blitz vom elektrischen Funken nicht dem Wesen nach, sondern nur dem Grade nach verschieden sei. Die Versuche mit der Leidener Flasche, welche sehr kräftige Funken gab, sprachen sehr für die Richtigkeit dieser Vermutung, ohne gerade einen entscheidenden Beweis dafür zu bilden. Franklin berührte diese Frage wiederholt in seinen Briefen an Collinson. So schrieb er im Jahre 1750: „Wenn die Gewitterwolken wirklich elektrisch sind, könnten dann nicht die Häuser, Kirchen, Schiffe u. s. w. durch Aufrichtung hoher zugespitzter Eisenstangen vor dem Blitzschlag geschützt werden? Vom Fuße einer solchen Eisenstange müßte ein Metalldraht an der Außenseite des Hauses herab in die Erde oder an der Seite des Schiffes herab in das Wasser gehen. Diese zugespitzten Eisenstangen würden wahrscheinlich ohne Geräusch die Elektrizität aus der Wolke ableiten, bevor diese so nahe kommt, daß ein Blitzschlag zu befürchten ist, und man würde sich auf diese Weise vor diesem schrecklichen Unglück schützen können."

§ 278. Franklin schlug vor, man möge feststellen, ob die Gewitterwolken elektrisch seien, und er glaubte, daß eine Person, die sich isoliert auf einen Turm oder einen anderen erhöhten Ort aufstellt und der Wolke eine zugespitzte Eisenstange entgegenhält, elektrisch werden würde, wenn die Wolke elektrisch sei (vgl. Fig. 219). Franklin selbst führte den Versuch nicht aus. Dagegen stellte ein Franzose namens D'Alibard im Jahre 1752 an einem Ort in der Nähe von Paris eine 40 Fuß hohe Eisenstange auf, die durch ein Holzgerüst einigermaßen isoliert war. Als am 10. Mai eine Gewitterwolke über die Stange hinwegzog, wurde sie so stark elektrisch, daß man $1^1/_2$ Zoll lange Funken aus derselben ziehen konnte. Zu derselben Zeit hatte Delor in Paris eine 99 Fuß hohe Eisenstange aufgestellt, aus der er am 18. Mai Funken erhielt, als eine Gewitterwolke über sie hinzog. Auch Franklin überzeugte sich durch einen Versuch davon, daß die Gewitterwolken elektrisch sind, und zwar im Juni desselben Jahres, noch ehe er von den in Europa ausgeführten Versuchen etwas gehört hatte. Er ließ einen aus Seidenzeug verfertigten Drachen gegen die Wolke emporsteigen. Am Drachen war eine Metallspitze und an dieser das Hanfseil befestigt, an dem der Drachen gehalten wurde. Am unteren Ende des Hanfseiles hing ein Schlüssel und an diesen war eine kurze seidene Schnur angebunden, die als isolierender Griff diente. Wenn der Drachen gegen eine Gewitterwolke emporstieg, so konnte man, namentlich wenn die Hanfschnur durch den Regen feucht geworden war, Funken aus dem Schlüssel ziehen. Nach diesen Versuchen konnte kein Zweifel mehr darüber bestehen, daß die Gewitterwolken elektrisch sind und daß der Blitz ein elektrischer Funke ist. Die Wirkung der Wolke auf die spitze Eisenstange oder auf den Drachen wird durch Fig. 218 erläutert.

Digitized by Google

Die Elektrizität der Wolke verteilt die Elektrizität in der Stange, und diese nimmt dieselbe Elektrizität an, welche die Wolke besitzt, indem die entgegengesetzte Elektrizität nach der Wolke hin ausströmt.

Franklin setzte eine zugespitzte Eisenstange auf sein Haus und mit Hilfe derselben konnte er den elektrischen Zustand der Luft beobachten. Welche Elektrizität die Stange enthielt, konnte er vermittelst eines elektrischen Pendels bestimmen. Zu seiner Verwunderung beobachtete er, daß es sowohl positiv elektrische als auch negativ elektrische Wolken gibt. In der Regel waren sie negativ elektrisch.

Zahlreiche Physiker beobachteten jetzt mit Hilfe einer „elektrischen Stange" den elektrischen Zustand der Wolken, sie versäumten aber, die nötigen Schutzvorrichtungen zu treffen. Eine solche Stange kann nämlich sehr gefährlich werden, denn wenn die Elektrizität der Wolken sehr stark ist, so wird auch die Stange sehr stark elektrisch und gibt dann kräftige Funken (Blitze) an die Umgebung ab. Professor Richmann in Petersburg wurde 1753 durch einen starken elektrischen Funken getötet, der eines Tages, als eine Gewitterwolke über sein Haus hinzog, aus seinem Elektrizitätszeiger herausfuhr. Dieser bestand aus einer eisernen Stange, die in einem Zimmer aufgestellt und durch eine Drahtleitung mit einer auf dem Dache des Hauses angebrachten Spitze verbunden, aber nicht nach der Erde abgeleitet war. Das Schicksal Richmanns schreckte jedoch andere Beobachter nicht ab. Professor Bose in Wittenberg (§ 265), fand sogar Richmanns Tod so schön, daß er sich einen ähnlichen wünschte, und ein anderer Zeitgenosse, Dr. Krünitz, fand das Schicksal Richmanns geradezu beneidenswert. Die elektrische Stange hatte eine wahre Begeisterung hervorgerufen, und der Name Franklins war in aller Munde.

§ 279. Franklin hatte, wie bereits erwähnt, einen praktischen Zweck im Auge. Er wollte die Gebäude und die Schiffe gegen Blitzschlag schützen, und er hatte die Idee des Blitzableiters bereits, ehe er bestimmt wußte, daß der Blitz ein elektrischer Funke ist. Die Stange, welche er auf seinem Hause aufrichtete, war der erste Blitzableiter, indem er von der Stange einen Draht herabführte, den er mit einer in einem Brunnen stehenden eisernen Pumpe verband.

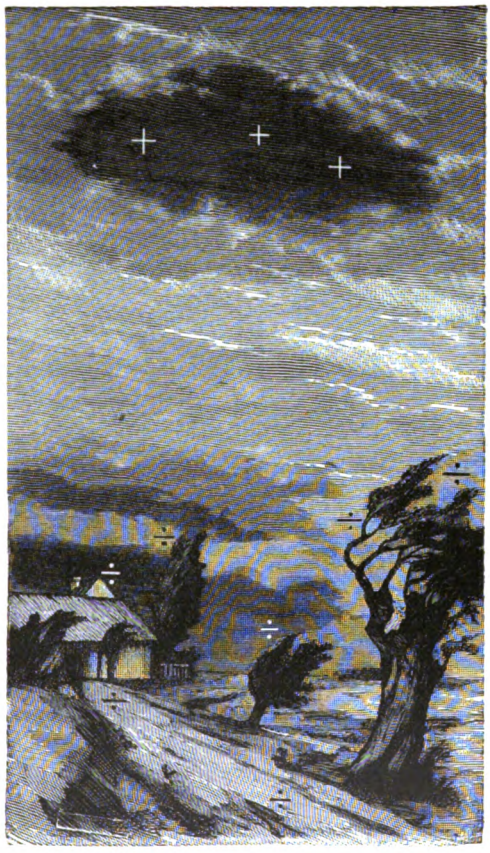
Dieser erste Blitzableiter hatte alle wesentlichen Eigenschaften, die ein guter Blitzableiter haben muß. Er ragte über das Gebäude hervor, welches gegen den Blitz geschützt werden sollte, und er war mit dem feuchten, d. h. leitenden Erdboden durch eine metallene Leitung verbunden. Wie hoch der Blitzableiter sein muß, damit er ein Gebäude sicher schützt, wie stark er sein muß, damit er nicht durch den Blitz geschmolzen wird, oder in welcher Weise man in jedem einzelnen Falle die Verbindung mit der Erde herzustellen hat, darüber konnte Franklin keine bestimmten Vorschriften geben. Auf diese Frage konnte nur die Erfahrung eine zuverlässige Antwort geben. Bevor wir auf diese Fragen näher eingehen, wollen

Digitized by Google

wir zunächst die Wirkung der Gewitterwolken auf die Erde und auf andere Wolken etwas näher betrachten.

§ 280. Durch Fig. 219 wird die verteilende Wirkung einer elektrischen Wolke auf die Erde veranschaulicht. Die negative Elektrizität (—) wird angezogen und die positive Elektrizität (+) wird abgestoßen. Die Verteilung der Erdelektrizität, d. h. die Elektrisierung der Erdoberfläche, hängt von verschiedenen Umständen ab, nämlich von der Stärke der Wolkenelektrizität, von der Höhe der Wolken über dem Erdboden und von der Beschaffenheit des Erdbodens an der betreffenden Stelle. Wenn dieser an der fraglichen Stelle die Elektrizität sehr schlecht leitet, so wird die Verteilung nur sehr gering sein, selbst wenn die Wolke sehr stark elektrisch ist. Wenn dagegen der Erdboden aus guten Leitern besteht, so wirkt die elektrische Wolke stark verteilend. Die Verteilung findet namentlich im feuchten Erdboden und im Wasser statt. In den feuchten Erdschichten sind es die Wurzeln der Bäume und anderer Gewächse, durch welche die angezogene Elektrizität in die oberirdischen Teile der Pflanzen emporsteigt. Auch in den Gebäuden wird die angezogene Elektrizität in die Höhe gesogen. Zwischen der Wolke und der Erde, sowie den auf ihr befindlichen Gegenständen, entsteht eine elektrische Spannung. Die Wolke und der Erdboden bilden die beiden Belegungen einer Ladungstafel, deren isolierende Schicht von der zwischenliegenden Luft gebildet wird. Wenn aber die Spannung zwischen den Belegungen einer Ladungstafel hinreichend stark wird, so „schlägt" die Elektrizität durch das Glas (§ 273). Ebenso schlägt auch die Elektrizität durch die Luftschicht zwischen der Wolke und der Erde, und die Elektrizitäten der Wolke und der Erde strömen zusammen. Wenn sich bedeutende Elektrizitätsmengen in kurzer Zeit durch die Luft vereinigen, so

Fig. 219.



Verteilende Wirkung einer Gewitterwolke.

Digitized by Google

entsteht ein elektrischer Funke, der den Weg bezeichnet, auf dem die Vereinigung stattfindet. Dieser elektrische Funke ist der Blitz. Sein Weg ist gewöhnlich eine Zickzacklinie, seltener eine gerade Linie. Die Eigenschaften und Wirkungen des elektrischen Funkens sind in § 298 näher beschrieben. Hier mag nur bemerkt werden, daß die Bahn des Blitzes durch zwei Umstände bestimmt wird. Der Blitz sucht diejenige Stelle der Erdoberfläche auf, wo die elektrische Spannung am größten ist, und die Spannung hängt von der Menge der verteilten Elektrizität und der Entfernung zwischen den beiden entgegengesetzten Elektrizitäten ab. Sodann sucht der Blitz den Punkt, an welchem die elektrische Spannung am stärksten ist, auf demjenigen Wege auf, welcher der Elektrizität den geringsten Widerstand entgegensetzt. — Wie das fließende Wasser immer denjenigen Weg wählt, auf dem der Fall am stärksten ist, so wählt die Elektrizität immer denjenigen Weg, wo sie am wenigsten Widerstand findet. Dies hatte Winckler durch Versuche mit der Leidener Flasche nachgewiesen. Wenn er nämlich die äußere und die innere Belegung gleichzeitig durch seinen Körper und einen langen dünnen Metalldraht in leitende Verbindung brachte, so spürte er nichts von der elektrischen Entladung, die ausschließlich durch den Metalldraht erfolgte.

Fig. 220.

Wirkung zwischen zwei Wolken.

Wenn sich in der Nähe der elektrischen Wolke eine unelektrische befindet, so übt die erstere ihre verteilende Wirkung nicht nur auf die Erde, sondern zugleich auch auf die unelektrische Wolke aus (Fig. 220). Wenn nun die Entladung zwischen den beiden Wolken stattfindet, so hört die verteilende Wirkung der Gewitterwolke auf und die getrennten Elektrizitäten in der Erde strömen zusammen. Dies macht sich auf den Teil der Erde, in welchem es stattfindet, in einer Weise geltend, als ob die Erde an dieser Stelle vom Blitz

Digitized by Google

getroffen würde. Dieser sog. Rückschlag wird zum erstenmal im Jahre 1779 von Lord Stanhope erwähnt. Er macht sich selbstverständlich auch an denjenigen Stellen der Erdoberfläche bemerkbar, die sich in der Nähe der Stelle befinden, nach der sich die Elektrizität entlädt, und er kann so stark sein, daß er Menschen und Tiere tötet.

§ 281. Franklins Blitzableiter war dieser Wirkung der Gewitterwolken entsprechend eingerichtet. Der Blitzableiter reicht bis in den feuchten Erdboden. In diesem wirkt die Gewitterwolke verteilend und die von der Wolke angezogene Elektrizität strömt durch den metallenen Leiter zur Spitze des Blitzableiters empor. Hier entsteht eine starke elektrische Spannung, die Elektrizität strömt gegen die Wolke aus und schwächt deren Elektrizität. Wenn aber die Spannung zwischen der Wolke und der Erde so stark ist, daß ein Blitz entsteht, so trifft dieser die Spitze des Blitzableiters, die der Wolke näher ist als das Gebäude, und deren Spannnng ebenfalls größer ist, als die Spannung des Gebäudes.

Viele Zeitgenossen Franklins verstanden die Wirkungsweise des Blitzableiters nicht. Einige von ihnen, z. B. der Arzt Johann Reimarus (1729 bis 1814) in Hamburg, befürchteten, wenn der Blitz in den Erdboden geführt werde, so würde er in dem Untergrundwasser Explosionen verursachen.

Der italienische Physiker Giovanni Beccaria (1716 bis 1781) hatte nämlich einen starken elektrischen Funken durch ein mit Wasser gefülltes Rohr schlagen lassen. Dabei fand eine so starke Dampfentwickelung statt, daß das Rohr zerplatzte. — Reimarus glaubte, es würde etwas ähnliches geschehen, wenn der Blitz durch den Ableiter in das Grundwasser geleitet würde, d. h. es würde eine starke Dampfentwickelung und infolgedessen eine heftige Explosion stattfinden. Reimarus glaubte, auf diese Weise könnten Erderschütterungen verursacht werden, die stark genug seien, um das Gebäude, auf dem sich der Blitzableiter befindet, zu zerstören. Dies war jedoch eine ganz unbegründete Befürchtung, denn die elektrische Entladung erfolgt auf demjenigen Wege, wo der Blitz den geringsten Widerstand findet. Je besser daher der Weg leitet, den man dem Blitz bietet, desto weniger Schaden wird er auf diesem Wege anrichten. Man muß auch bedenken, daß der Blitz in der Vereinigung der beiden Arten der Elektrizität besteht, von denen die eine von der Wolke, die andere von der Erde kommt. Es ist daher einerlei, ob man sagt, der Blitz schlage von der Wolke nach der Erde oder er schlage von der Erde nach der Wolke. Wie man die Sache auch auffaßt, die Aufgabe des Blitzableiters besteht darin, zwischen der Elektrizität der Wolke und der durch Verteilung hervorgerufenen Elektrizität der Erde eine leitende Verbindung herzustellen. Deshalb muß die Leitung bis in das Grundwasser gehen.

Ein anderes Bedenken, welches gegen den Franklinschen Blitzableiter erhoben wurde, galt der Spitze. Benjamin Wilson (1708 bis 1788), Mitglied der Royal Society, erklärte einen spitzen Blitzableiter für gefährlich, weil er den Blitz anzieht, d. h. weil er bewirkt, daß von einer Wolke ein

Digitized by Google

Schlag erfolgt, der sonst nicht an der betreffenden Stelle auf die Erde gekommen sein würde. Nach Wilsons Ansicht müßte der Blitzableiter nicht mit einer Spitze, sondern im Gegenteil mit einer Kugel endigen.

Andere Physiker waren der Ansicht, der Blitzableiter müsse nicht nur mit einer Spitze, sondern mit einer größeren Anzahl von Spitzen versehen sein. Tatsächlich ist es ziemlich einerlei, ob der Blitzableiter spitz oder stumpf endigt, wenn es sich darum handelt, einen Blitz aufzufangen. Vielleicht ist die „Schlagweite" des Blitzes nach einem spitzen Ableiter etwas größer als nach einem stumpfen, dafür wirkt aber der spitze Ableiter mehr dadurch „ableitend", daß von ihm viel mehr Elektrizität nach der Wolke überströmt als von dem stumpfen. Heutzutage werden allgemein spitze Blitzableiter benutzt.

§ 282. An vielen Orten stieß die Einführung des Blitzableiters auf heftigen Widerstand, weil man im Blitz ein Züchtigungsmittel in der Hand Gottes und infolgedessen in der Anwendung des Blitzableiters den Versuch erblickte, sich einer von Gott verhängten gerechten Strafe zu entziehen. Diesen Vorurteilen sowie der fehlerhaften Aufstellung von Blitzableitern ist es zuzuschreiben, daß sich diese Vorrichtung nur langsam und durchaus nicht allgemein eingebürgert hat.

Heutzutage werden Blitzableiter vorzugsweise nur auf wertvollen Bauten sowie auf Schulen, Hospitälern, Gefängnissen, Kasernen, Museen, Bibliotheken, Pulvermagazinen und anderen öffentlichen Gebäuden angebracht. Nur in wenigen Gegenden werden auch die Privatgebäude allgemein mit Blitzableitern versehen. Eine Gegend, in der fast jedes Haus mit einem Blitzableiter versehen ist, ist z. B. Westholstein.

Bei Blitzableiteranlagen handelt es sich hauptsächlich um die Frage, wie man ein Gebäude am billigsten gegen Blitzgefahr schützt. Der Blitzableiter selbst besteht im wesentlichen aus denselben drei Teilen wie zur Zeit Franklins, nämlich aus der Erdleitung, der Luftleitung und der Auffangstange.

Die Erdleitung soll eine gute Verbindung zwischen der Luftleitung und der Erde herstellen. Sie besteht aus einer Platte oder einem Netz aus demselben Metall (Eisen oder Kupfer) wie die Luftleitung. Auch Zink findet nicht selten Verwendung. Die Platte wird am besten im Grundwasser angebracht, jedenfalls aber in feuchter Erde, so daß sie gut „abgeleitet" ist. Wenn die Platte in Wasser steht, so muß sie ungefähr ein Quadratmeter groß sein. Wenn sie in feuchter Erde steht, so muß sie doppelt so groß sein. Wenn das Grundwasser sehr tief liegt, bringt man in der Nähe der Erdoberfläche eine „Hilfsplatte" an, deren Umgebung durch das eindringende Regenwasser leitend wird. Die Platte muß senkrecht stehen, weil dann die Elektrizität gleich gut nach beiden Seiten hin abgeleitet wird. Steht die Platte in einem Brunnen, so darf sie nicht aus Kupfer bestehen, weil dies Metall das Wasser vergiften würde.

Die Luftleitung bildet die Verbindung zwischen der Erdplatte und der Auffangstange und soll aus demselben Metall, Eisen oder Kupfer, bestehen

Digitized by Google

wie die Erdplatte. Beide Metalle werden in der Regel in Form von Drahtseilen angewandt, die aus 7 bis 10 Drähten zusammengedreht sind. Galvanisierter Eisendraht ist ebenso haltbar und bedeutend billiger als Kupferdraht.

Die Auffangstange, der oberste Teil des Blitzableiters, ist eine Eisenstange, auf die eine kräftige Kupferspitze (Fig. 221) aufgeschraubt ist. Das obere Ende dieser Spitze besteht aus Platin, welches sehr schwer schmelzbar ist und an der Luft keine Veränderung erleidet.

Fig. 221.

Kupferspitze des Blitzableiters.

Die einzelnen Teile des Blitzableiters müssen sorgfältig zusammengeschraubt und zusammengelötet sein, so daß sie von der Spitze bis zur Erdplatte eine ununterbrochene metallene Leitung bilden.

§ 283. Es fragt sich nun, welche Dimensionen ein Blitzableiter haben muß und bis auf welche Entfernung sich die Wirkung desselben erstreckt. Diese Fragen können nur auf dem Wege der Erfahrung beantwortet werden. Besteht der Leiter aus einem Kupferseil, so muß dieses etwa 15 mm dick sein, und die einzelnen Drähte müssen einen Durchmesser von mindestens 2 mm haben. Eine Kupferstange von 10 mm Durchmesser leistet dieselben Dienste. Ist der Leiter ein Eisenseil, so muß dieses etwa 25 bis 30 mm dick sein. Der Durchmesser der einzelnen Drähte muß etwa 4 mm sein. Eine massive Eisenstange muß 20 mm dick sein. Was die Erdplatte betrifft, so muß eine kupferne mindestens 2 mm und eine eiserne mindestens 5 mm dick sein. Bei diesen Dimensionen ist nicht zu befürchten, daß der Leiter durch einen Blitzschlag zum Schmelzen gebracht wird, und die Erdplatten von der angegebenen Dicke halten sich eine längere Reihe von Jahren, ohne vollständig durch Oxydation zerstört zu werden. An und für sich wirkt eine dünne Platte selbstverständlich gerade so gut wie eine dicke.

Fig. 222.

Einfacher Schutzkreis des Blitzableiters.

Die Frage, wie groß der Raum ist, der durch einen Blitzableiter geschützt wird, ist sehr schwer zu beantworten, da dies von sehr verschiedenen Umständen abhängt, z. B. in hohem Grade von der Richtung, aus der ein Blitz, der das Gebäude trifft, voraussichtlich kommt. In ebenen Gegenden ziehen die Wolken in der Regel hoch über der Erdoberfläche, und man kann mit Sicherheit annehmen, daß die Richtung eines Blitzes von der Vertikallinie niemals um 45° abweicht. Unter dieser Voraussetzung wird aber ein Gebäude offenbar geschützt sein, wenn die Auffangstange des Blitzableiters eine Höhe hat, die größer ist als die Entfernung der Auffangstange von dem entferntesten Punkt der Dachfirste, denn dann

Digitized by Google

ist der Weg durch den Blitzableiter kürzer als jeder andere Weg durch das Gebäude (s. Fig. 222 a. v. S.). In der Figur ist die Höhe der Auffangstange gleich der halben Länge der Dachfirste und von der Spitze der Auffangstange ist eine punktierte Linie gezogen, die mit der Vertikallinie einen Winkel von 45° bildet. — Denkt man sich nun, die Wolke, welche ihre Elektrizität auf das Gebäude entlädt, befinde sich innerhalb des durch die punktierten Linien angedeuteten Kegels, so ist leicht einzusehen, daß die Spitze des Blitzableiters dem ankommenden Blitz näher ist als irgend ein anderer Punkt in dem Raume zwischen den beiden Linien unter der Auffang-

Fig. 223.

Einfluß der Form des Daches auf die Höhe des Blitzableiters.

stange, dem sog. ersten Schutzkreis oder Schutzkegel. Aus Fig. 223 ist leicht zu ersehen, daß die Höhe der Auffangstange in hohem Grade durch die Form des Daches bestimmt wird.

Flache Dächer erfordern eine höhere Auffangstange als steile Dächer, und wo die Giebelmauer bis zur Dachfirste reicht, ist eine viel höhere Auffangstange erforderlich als bei einem schiefen Giebeldach (s. Fig. 223). Die Grundfläche und die Mauerhöhe ist bei allen drei Gebäuden der Figur dieselbe.

Es ist jedoch nicht notwendig, daß das ganze Gebäude im ersten Schutzkegel liegt, aber in demselben müssen die höchst gelegenen Ecken, die Schornsteine, Türme u. dergl. liegen. Ein Sachverständiger wird bei dem Entwerfen einer Blitzableiteranlage auf die vorliegenden Verhältnisse Rücksicht nehmen. Allgemeine Regeln lassen sich nicht für alle Einzelheiten geben. Die höchstgelegenen Kanten sollen im zweiten Schutzkegel liegen, der doppelt so weit spannt als der erste. Alle hochgelegenen Dachflächen sollen im dritten Schutzkegel liegen, die tiefliegenden Ecken dagegen im „Kegel $2^1/_2$".

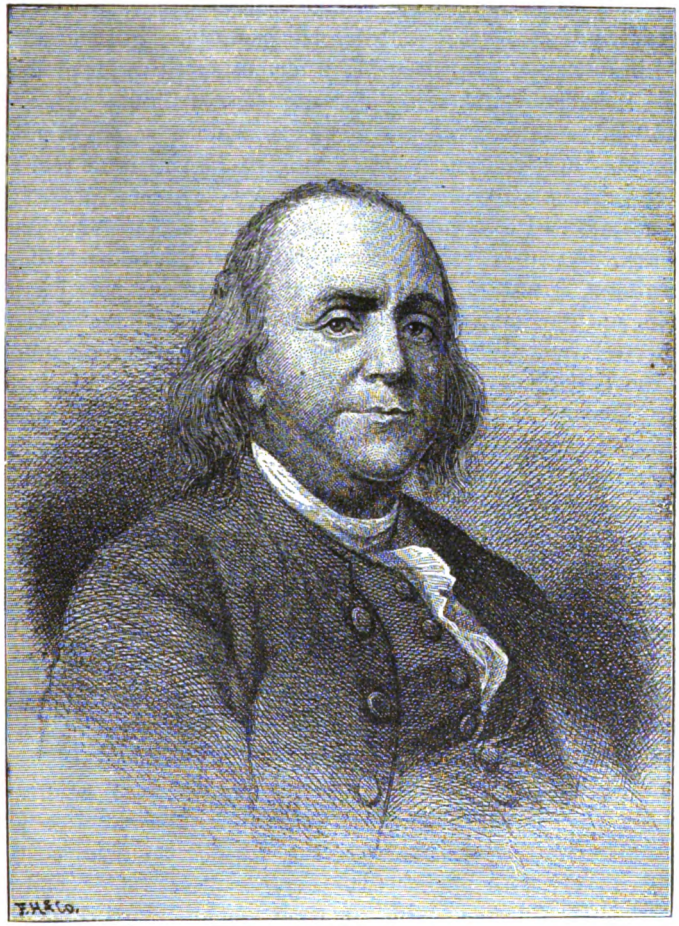
Um nun diese Bedingungen zu erfüllen, ohne zu viele Auffangstangen verwenden zu müssen, liegt es nahe, diese recht hoch zu wählen. Dies ist jedoch unpraktisch, weil hohe Auffangstangen sehr schwer sind, namentlich aber, weil sie schwer zu revidieren sind. Es ist daher zweckmäßiger, eine größere Anzahl niedriger Auffangstangen zu benutzen, als eine geringe Anzahl hoher.

Der Blitz sucht, wie gesagt (§ 280), denjenigen Punkt auf, an welchem die Spannung am größten ist. Es muß daher stets dafür gesorgt werden, daß die Spitze des Blitzableiters stärker elektrisch ist, als irgend ein anderer

Digitized by Google

Teil des Gebäudes. Dies wird in den meisten Fällen ohne besondere Vorrichtungen der Fall sein. Wenn aber das Gebäude große Metallmassen (Wasserleitungen, Dachrinnen) enthält, so müssen diese mit dem Blitzableiter verbunden werden, so daß sie gewissermaßen einen Teil desselben bilden.

Fig. 224.



Benjamin Franklin.

§ 284. Nur während der Jahre 1745 bis 1760 fand Franklin Zeit, sich mit eingehenden naturwissenschaftlichen Studien zu beschäftigen. Später war er zu sehr durch seine politische und soziale Tätigkeit in Anspruch genommen. Vor dem amerikanischen Freiheitskriege war er Vertreter von Pennsylvanien und einiger anderer Staaten in London, während des Krieges hielt er sich als Vertreter der Vereinigten Staaten in Paris auf. An der

Digitized by Google

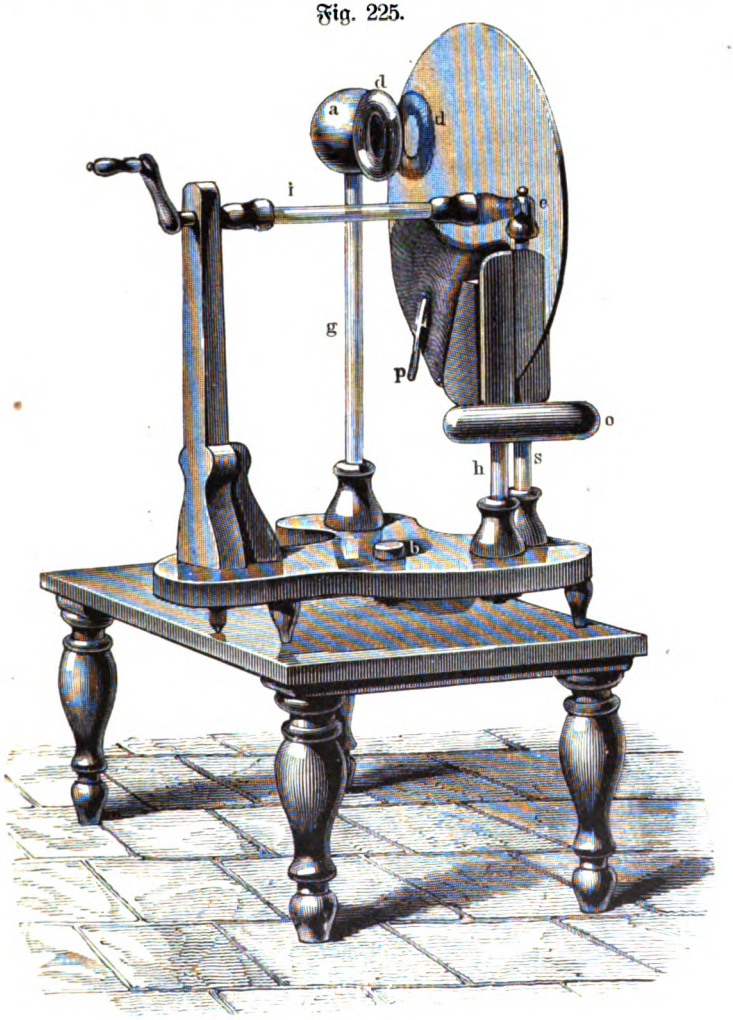
Abfassung der Unabhängigkeitserklärung und der Verfassung der Vereinigten Staaten hat er wesentlichen Anteil genommen. Er war aber nicht nur der kluge und hochgeachtete Staatsmann des jungen selbständigen Amerikas, sondern er war in verschiedener Hinsicht sozusagen der Erzieher des amerikanischen Volkes. Er bildete den Mittelpunkt für die geistigen Bestrebungen in den Kreisen der englischen Kolonisten. Er stiftete eine Bibliothek, gründete eine Universität und war mit Erfolg bestrebt, durch zahlreiche Schriften, eine Zeitung und einen gediegenen Kalender die moralische, geistige und politische Bildung seines Volkes zu heben. Was ihn besonders befähigt machte, eine erzieherische Tätigkeit auszuüben, war sein eigener Drang nach Wissen und Erkenntnis. Er beschäftigte sich mit Geschichte, Philosophie, Naturwissenschaften und Soziologie, und er verstand es vortrefflich, die Ausbeute seiner Studien anderen mitzuteilen. Die Gelehrten in Europa lasen mit großem Interesse seine wissenschaftlichen Schriften, die in einer leicht verständlichen Sprache abgefaßt waren. Franklin war ein ausgezeichneter „populärer" Schriftsteller, der es verstand, gründlich und erschöpfend, dabei aber doch für jedermann verständlich zu schreiben. Franklin war ein vortrefflicher Bürger, beseelt vom Geiste des Handelns und von einem unerschütterlichen Glauben an den Sieg der Gerechtigkeit. — Als er nach Paris kam, wurde er vergöttert, ja die verfeinerte Pariser Gesellschaft erblickte in ihm die Verkörperung des Rousseauschen idealen Naturmenschen. — Seine letzten sozialpolitischen Handlungen waren die Begründung einer Gefängnisgesellschaft (1787) und ein dem Kongreß 1790, wenige Monate vor seinem Tode, unterbreiteter Antrag, den Sklavenhandel und die Sklaverei abzuschaffen.

§ 285. Jetzt können wir eine vollständigere Beschreibung der gewöhnlichen Elektrisiermaschine geben. Die Scheibe, welche vermittelst einer Kurbel gedreht wird, besteht in der Regel aus Glas und wird positiv elektrisch, während sie durch das Reibzeug gleitet. Dieses sowie der Konduktor *o* (Fig. 225) werden also negativ elektrisch. Der geriebene Teil der Glasscheibe bewegt sich durch eine Tasthülle nach der Saugvorrichtung *d*. Wenn sich die positiv elektrische Glasscheibe den Spitzen nähert, so wird die Elektrizität in diesen und im Konduktor *a* verteilt. Die Spitzen werden negativ elektrisch, während der Konduktor positiv elektrisch wird. Die negative Elektrizität strömt durch die Spitzen aus und vereinigt sich mit der positiven Elektrizität der Scheibe. Diese wird infolgedessen nahezu unelektrisch. Beim Hindurchgehen durch das Reibzeug wird sie dann wieder elektrisch und dieselben Prozesse wiederholen sich. Die Wirkung des Reibzeuges besteht darin, daß die beiden Arten der Elektrizität voneinander getrennt werden. In den Reibungsflächen selbst entsteht eine verteilende Kraft. Diese hat aber nur eine bestimmte Größe. Wenn daher der mit dem Reibzeug verbundene Konduktor *o* eine gewisse Ladung bekommen hat, so bewirkt eine fortgesetzte Reibung keine Verstärkung der Ladung mehr. Die in *o* bereits angekommene negative Elektrizität verhindert das Zuströmen weiterer Elektrizität derselben Art. Die Reibung wirkt nicht mehr und die Scheibe wird nicht elektrisch. Aus diesem

Digitized by Google

Grunde wird *o* nach der Erde abgeleitet. Dann strömt die negative Elektrizität nach der Erde, in den Reibungsflächen entsteht neue Elektrizität und der Konduktor *a* wird weiter geladen. Aber auch jetzt kann die Ladung nur eine bestimmte Größe erreichen. Wenn nämlich *a* so stark mit positiver Elek-

Fig. 225.



Elektrisiermaschine.

trizität geladen ist, daß die positiv elektrische Glasscheibe nicht mehr kräftig genug ist, um auf den Konduktor verteilend zu wirken, so gibt dieser keine negative Elektrizität mehr ab und seine Ladung bleibt unverändert. Wenn sich die Elektrizität in einem Konduktor halten soll, so darf er keine Ecken und Kanten haben, sondern alle Teile desselben müssen eine abgerundete Gestalt haben.

Digitized by Google

§ 286. Der Abbé Nollet war der erste, der die Ladung der elektrischen Körper zu messen versuchte. Das elektrische Pendel, welches bereits Dufay in einer etwas primitiven Form benutzte, ist eine Art Meßapparat. Namentlich können zwei elektrische Pendel, die beide dadurch elektrisch gemacht werden, daß man sie mit demselben Körper in Berührung bringt, als Meßapparat dienen. Wenn nämlich die beiden Pendelkügelchen einander angenähert werden, so stoßen sie sich gegenseitig ab, und aus der Größe des Ausschlages kann man einen Schluß auf die Größe der elektrischen Kraft der Kügelchen ziehen. Nollet maß daher den Winkel, den die beiden Pendelfäden miteinander bilden, vermittelst eines geteilten Kreisbogens, den er hinter den Pendeln anbrachte. Es war jedoch nicht möglich, mit einer derartigen Vorrichtung ein genaues Maß für die Elektrizitätsmengen der Kügelchen zu bekommen. Dasselbe gilt von einem Verfahren, welches von John Ellicott und von Gralath vorgeschlagen wurde. Sie ermittelten die Anziehung, welche ein elektrischer Körper auf die eine Schale einer Wage ausübt.

John Canton und namentlich sein Kollege in der Royal Society, Tiberio Cavallo (1749 bis 1809), gestalteten das doppelte elektrische Pendel zu einem feineren Apparat um. In Cavallos Elektroskop (Fig. 226) sind die Pendel in ein Glasgefäß eingeschlossen, damit sie nicht durch den Luftzug bewegt werden. Die leinenen Pendelfäden sind an einem Metallstabe befestigt, der in den Hals des Glasgefäßes mit Siegellack eingekittet ist und mit einer großen Messinghaube EF in Verbindung steht. Wird dieser Haube ein elektrischer Körper angenähert, so wird die Elektrizität in dem Apparate verteilt. Die Pendelkügelchen bekommen dieselbe Elektrizität und stoßen sich einander ab. Wird der elektrische Körper entfernt, so fallen die Kügelchen wieder zusammen.

Fig. 226.

Cavallos Elektroskop.

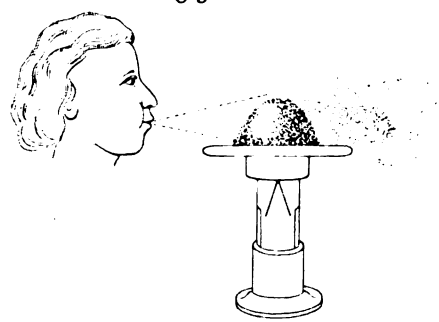
Das Elektroskop kann auch so „geladen" werden, daß es die Art der Elektrizität ebenso wie das einfache geladene Pendel anzeigt (§ 264). Wird z. B. der Haube des Elektroskops ein positiv elektrischer Körper genähert, so wird die negative Elektrizität in der Haube festgehalten, die positive dagegen in die Kügelchen abgestoßen. Berührt man jetzt die Haube mit dem Finger, so wird die positive Elektrizität abgeleitet und die Kügelchen fallen zusammen. Entfernt man sodann den elektrischen Körper, so wird die negative Elektrizität nicht mehr in der Haube festgehalten, sondern kommt auch in die Kügelchen. Diese gehen also mit negativer Elektrizität auseinander. Das Elektroskop ist durch Verteilung geladen (vgl. § 274).

Wenn jetzt ein positiv elektrischer Körper angenähert wird, so wird der Ausschlag der Kügelchen kleiner, wenn dagegen ein negativ elektrischer Körper angenähert wird, so wird der Ausschlag größer. — Wenn die Kügelchen eine

Digitized by Google

so starke Ladung bekommen, daß sie an die Glaswand anschlagen, so wird dieser etwas Elektrizität mitgeteilt, was bei weiteren Versuchen mit dem Elektroskop störend sein würde. Man bringt daher an den Stellen der Glaswand, wo diese von den Kügelchen getroffen werden kann, zwei Stanniolstreifen *I* und *K* an, die mit der Unterlage des Glasgefäßes in Verbindung stehen. Wenn dann die Kügelchen die Stanniolstreifen berühren, so wird die Elektrizität augenblicklich nach der Unterlage abgeleitet. Die Stanniolstreifen geben zugleich dem Instrument einen höheren Grad von Empfindlichkeit. Die Elektrizität der Pendelkügelchen wirkt nämlich auf die Stanniolstreifen verteilend und es macht sich infolgedessen eine Anziehung zwischen den Kügelchen und den Metallstreifen geltend.

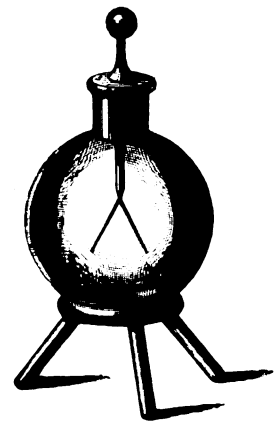
Fig. 227.



Bennets Elektroskop.

Zwei Jahre später, 1781, veröffentlichte Volta eine Beschreibung seines Elektrometers, in dem die Kugelpendel durch zwei Strohhalme ersetzt waren. Das Voltasche Instrument war sehr empfindlich und zeigte für dieselbe Ladung stets denselben Ausschlag. Endlich ersetzte der englische Geistliche und Physiker Abraham Bennet (1750 bis 1799) im Jahre 1786 die Strohhalme durch zwei feine Goldblättchen. In Fig. 227 ist eine von Bennets Zeichnungen wiedergegeben, durch welche die Empfindlichkeit des Instrumentes veranschaulicht wird. Die Messinghaube des Cavallo'schen Instrumentes ist durch eine Messingplatte ersetzt. Auf dieser liegt ein Häufchen Kreidepulver. Wenn Bennet auf das Pulver blies, so kam es in Bewegung, durch die Reibung entstand Elektrizität und die Goldblättchen gingen auseinander. Diese empfindlichen Apparate werden namentlich bei Beobachtungen über den elektrischen Zustand der Atmosphäre benutzt. Eine der verschiedenen Formen des Elektroskops, die heute gebräuchlich sind, ist die in Fig. 228 abgebildete.

Fig. 228.



Goldblattelektroskop.

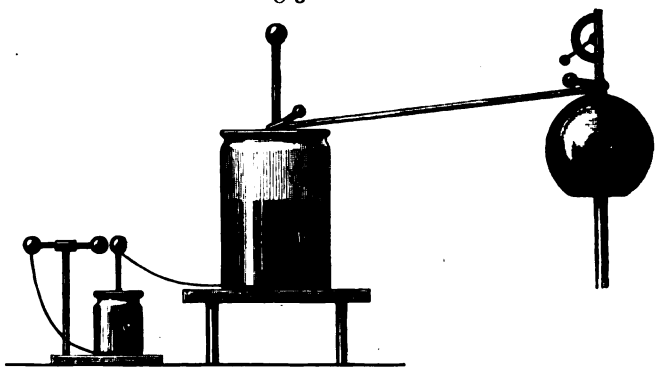
Zu den elektrischen Meßapparaten, die bereits in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts benutzt wurden, gehört die Lane'sche Maßflasche. Timothy Lane (1734 bis 1807), Apotheker in London, veröffentlichte 1767 eine Abhandlung, in welcher er beschrieb, wie sich die Ladung einer Leidener Flasche mit der Ladung einer anderen vergleichen läßt.

Die Flasche *b* (Fig. 229 a. f. S.) ist isoliert aufgestellt und wird vom

Digitized by Google

Konduktor *a* einer Elektrisiermaschine geladen. Die äußere Belegung dieser Flasche ist durch einen Metallstab mit dem Knopf einer kleineren Leidener Flasche, der Maßflasche *c*, verbunden, deren äußere Belegung nicht isoliert ist. Von der äußeren Belegung der Maßflasche geht ein Draht nach einem verschiebbaren Metallstäbchen, welches an den Enden mit Kugeln versehen ist, von denen die eine der Kugel der Maßflasche mehr oder weniger angenähert werden kann. Geht nun z. B. vom Konduktor nach der Flasche *b* positive Elektrizität, so wird die positive Elektrizität der äußeren Belegung von *b* in

Fig. 229.



Lanesche Maßflasche.

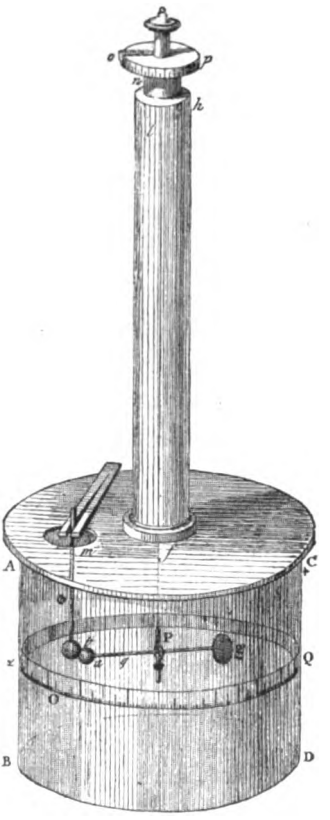
die Maßflasche abgestoßen, und wenn diese eine gewisse Ladung erhalten hat, so schlägt zwischen der Kugel der Maßflasche und der verschiebbaren Kugel ein Funken über. Fährt man mit dem Laden von *b* fort, so wird auch *c* von neuem geladen, und wenn die Ladung die erforderliche Größe erreicht hat, so springt wieder ein Funken über. Die Anzahl der übergeschlagenen Funken bildet ein Maß für die Ladung der Flasche *b*. Auch die Ladung einer Batterie von Leidener Flaschen läßt sich durch die Maßflasche bestimmen. Die Maßflasche ermöglicht es also, die Elektrizitätsmengen, welche verschiedene Leidener Flaschen aufnehmen können, zu vergleichen, aber sie gestattet nicht, die wirkliche Größe der Ladung zu bestimmen. Je größer der Abstand der Kugel der Maßflasche von der verschiebbaren Kugel ist, desto stärker muß die Maßflasche geladen werden, bis ein Funken überschlägt.

§ 287. Erst durch die Untersuchungen C. A. Coulombs über die elektrische Anziehung und Abstoßung wurde die Ausführung genauer elektrischer Messungen ermöglicht. Da die Coulombsche Drehwage bereits früher (§ 215 und 216) eingehend beschrieben worden ist, bedarf Fig. 230, welche Coulombs eigenen Apparat vorstellt, keiner näheren Erklärung. — Das Stäbchen besteht aus Schellack und hängt an einem Silberdraht von bekanntem Torsionswiderstand. An dem einen Ende ist ein Holundermarkkügelchen *a*, am anderen Ende zur Herstellung des Gleichgewichtes eine mit Terpentin befeuchtete Papierscheibe *g* befestigt. Diese Scheibe hat zugleich den Zweck, die

Digitized by Google

Schwingungen zu dämpfen. Durch das Loch *m* im Deckel des weiten Zylinders kann ein Schellackstäbchen hinabgelassen werden, welches an seinem unteren Ende ebenfalls ein Holundermarkkügelchen *t* trägt, welches dieselbe Größe hat wie das Kügelchen *a*. — Wenn ein Versuch ausgeführt werden soll, so wird das horizontale Schellackstäbchen zunächst so eingestellt, daß es auf den Nullpunkt der Kreisteilung deutet, während der Draht keine Torsion hat.

Fig. 230.



Coulombs Drehwage.

Coulomb gab nun zunächst der Kugel *t* eine elektrische Ladung und senkte sie in den Zylinder, so daß sie die Kugel *a* berührte. Dann waren die beiden Kugeln gleich stark geladen und stießen sich einander ab. Bei einem von Coulomb ausgeführten Versuche wurde die bewegliche Kugel von der festen so weit abgestoßen, daß der Abstand beider Kugeln im Bogen 36° betrug, der Draht also eine Torsion von 36° bekam. Dann mußte der Torsionskopf um 126° in der entgegengesetzten Richtung gedreht werden, um den Abstand der beiden Kugeln auf 18° zu vermindern. In dieser Stellung war die Torsion des Silberdrahtes $126^0 + 18^0 = 144^0$, also gleich dem Vierfachen von 36°. Wurde der Torsionskopf um 567° gedreht, so war der Winkelabstand zwischen *a* und *t* nur $8^1/_2{}^0$. Jetzt war die Torsion des Drahtes $567 + 8^1/_2 = 576$, was gleich 16×36^0 oder 4×144^0 ist. Hieraus folgt, daß die Kraft, mit der sich zwei gleich stark elektrisierte Kugeln abstoßen, abnimmt, wie das Quadrat der Entfernung zunimmt. Im doppelten Abstande ist die Abstoßung viermal so klein als im einfachen Abstande u. s. w. — Bei Ausführung dieser Versuche müssen verschiedene Vorsichtsmaßregeln beachtet werden, namentlich muß dafür gesorgt werden, daß die Luft in dem Zylinder der Drehwage vollkommen trocken ist, was dadurch erzielt werden kann, daß man ein Gefäß mit Schwefelsäure in den Zylinder stellt.

In ähnlicher Weise zeigte Coulomb, daß die Anziehung zwischen zwei Kugeln, die verschiedene Elektrizität enthalten, dasselbe Gesetz befolgt (vergl. § 216).

Endlich zeigte Coulomb, daß die elektrische Anziehung oder Abstoßung mit der Größe der Ladung der Holundermarkkügelchen zunimmt. Erhielt jedes der beiden Kügelchen nur die halbe Ladung, so wurde die Anziehung

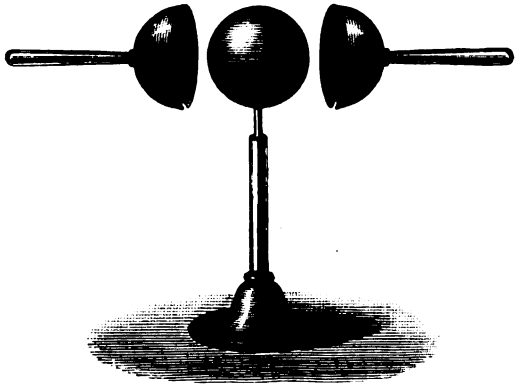
Digitized by Google

oder Abstoßung viermal so klein. Erhält das eine Kügelchen eine halbe, das andere eine viertel Ladung, so wird die Wirkung $2 \times 4 = 8$ mal so klein u. s. w. — Die verschiedenen Ladungen erzielte Coulomb in der Weise, daß er das geladene Kügelchen einmal oder mehrmals mit einem unelektrischen Kügelchen von gleicher Größe berührte.

§ 288. Diese feinen Messungen gaben Coulomb Veranlassung, Beobachtungen darüber anzustellen, wie schnell sich die Elektrizität in mehr oder weniger feuchter Luft verliert und wieviel Elektrizität durch die Leitung der sog. Isolatoren verloren geht. Er fand, daß Aepinus recht hatte mit der Behauptung, daß alle sog. Isolatoren die Elektrizität etwas leiten, selbst wenn es im Vergleich mit den eigentlichen Leitern verschwindend ist.

Von größerer Bedeutung war seine Untersuchung darüber, wo die Elektrizität auf einem guten Leiter, z. B. auf einer Metallkugel, ihren Sitz hat. Die Vermutung liegt nahe, daß sich die Elektrizität gleichmäßig in der ganzen Kugel verteilt, ebenso wie sich die Luft in einem geschlossenen Raume gleichmäßig verteilt. Die Elektrizität zeigt jedoch ein ganz anderes Verhalten. Coulomb fand, daß eine hohle Metallkugel genau dieselbe Menge Elektrizität aufnimmt wie eine massive Metallkugel von demselben Radius. Dies konnte er mit seiner Drehwage nachweisen. Wenn die massive (isolierte) Kugel geladen und dann mit der Hohlkugel berührt wurde, so ging die Hälfte der Elektrizität auf die letztere über. Hieraus folgt, daß sich die Elektrizität auf der Oberfläche der Kugel ansammelt. Man kann sich auch leicht eine Vorstellung davon machen, weshalb im Inneren eines Körpes keine Elektrizität sein kann. Wenn nämlich daselbst zwei kleine Elektrizitätsmengen wären, so würden sie sich einander abstoßen, und da der gute Leiter der Bewegung der Elektrizität keinen Widerstand entgegensetzt, so entfernen sie sich so weit als möglich voneinander, d. h. sie begeben sich an die Oberfläche. Weiter können sie sich nicht entfernen, da die Luft ein guter Isolator ist, der die Bewegung der Elektrizität verhindert. Wenn der gute Leiter die Form einer Kugel hat, so breitet sich die Elektrizität gleichförmig über die Oberfläche aus.

Fig. 231.



Versuch von Cavendish.

Cavendish (I, § 306) hat zuerst nachgewiesen, daß sich die Elektrizität in einem guten Leiter nur an der Oberfläche befindet. Sein Versuch wird durch Fig. 231 veranschaulicht. Eine isolierte Messingkugel wird mit Elektrizität geladen und dann in eine aus zwei Teilen bestehende Hohlkugel ein-

Digitized by Google

geschlossen. Entfernt man dann die beiden Hälften der Hohlkugel, die an isolierenden Griffen gehalten werden, so zeigt es sich, daß die innere Kugel unelektrisch ist, während die Halbkugeln elektrisch sind.

Wenn also ein Raum von einer leitenden Fläche umschlossen wird, und wenn die in dem Raume befindlichen Körper mit der umschließenden Fläche in Verbindung sind, so kann keine Elektrizität in dem Raume enthalten sein. — Faraday hat dies später in folgender Weise gezeigt. Er ließ einen großen hölzernen Kasten (die Kantenlänge war 2 m) anfertigen und die Außenseite desselben mit Stanniol bekleiden. Er begab sich mit einem feinen Elektroskop in den Kasten und ließ die Stanniolbekleidung stark elektrisieren. Im Inneren des Kastens war nichts von Elektrizität zu bemerken.

§ 289. Auf der Oberfläche einer Metallkugel breitet sich, wie gesagt, die Elektrizität gleichförmig aus (wenn kein Leiter in der Nähe ist, in dem Verteilung stattfindet). Coulomb untersuchte, wie sich die Elektrizität auf Leitern von anderer Form ausbreitet. Er benutzte bei diesen Versuchen ein sog. Probescheibchen, d. h. ein kleines Metallplättchen, welches an einem isolierenden Stiel befestigt ist. Um die „Dichte" (Stärke) der Elektrizität an einer Stelle des Leiters zu bestimmen, berührte er diese mit dem Probescheibchen. Dieses nahm so viel Elektrizität auf, daß es in denselben elektrischen Zustand kam wie die berührte Stelle, und die Größe der Ladung des Scheibchens ermittelte er dann mit Hilfe seiner Drehwage.

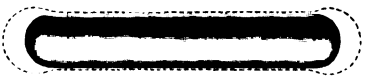
Fig. 232.

Geladenes Ellipsoid.

Fig. 233.

Geladene Scheibe.

Fig. 234.



Geladener Zylinder.

Auf einem Ellipsoid ist die Elektrizität am „dichtesten" an den Endpunkten der großen Achse (Fig. 232), auf einer Scheibe am Rande (Fig. 233) und auf einem Zylinder mit halbkugelförmigen Enden an diesen letzteren (Fig. 234). Je dünner der scheibenförmige Leiter ist, desto größer wird die Dichte der Elektrizität am Rande. Wenn daher ein geladener Leiter scharfe Kanten oder Spitzen hat, so ist die Dichte der Elektrizität in diesen besonders groß (vgl. § 276). — Die Dichte der Elektrizität auf Leitern von bestimmter Form läßt sich mathematisch berechnen. Dabei wird von dem Coulombschen Gesetz der Abstoßung gleichartiger Elektrizitätsmengen ausgegangen, und die Berechnungen bilden eine Bestätigung der Coulombschen Versuchsresultate.

§ 290. Durch die Arbeiten Coulombs wird es ermöglicht, mit voller Bestimmtheit und Klarheit von „Elektrizitätsmengen" zu sprechen und diese mit einer bestimmten Einheit zu messen. Man kann z. B. sagen, daß zwei kleine Kugeln (materielle Punkte), die mit derselben Art von Elektrizität gleich

Digitized by Google

stark geladen sind, die Einheit der Elektrizitätsmenge enthalten, wenn sie sich im Abstande 1 mit der Kraft 1 abstoßen.

Aus dem Coulombschen Gesetz der elektrischen Abstoßung und Anziehung folgt, daß die über die Oberfläche einer Kugel gleichförmig ausgebreitete Elektrizität auf einen elektrischen „Punkt" außerhalb der Kugel genau so wirkt, als ob sie im Mittelpunkt der Kugel vereinigt wäre. Dieser Satz läßt sich durch eine mathematische Entwickelung beweisen, auf die wir hier nicht näher eingehen können.

Eine geladene Kugel wirkt mit ihrer elektrischen Kraft nach allen Richtungen hin. Die Umgebung der Kugel, soweit sich die Wirkung der elektrischen Ladung bemerklich macht, wird das elektrische Feld der Kugel genannt. Streng genommen reicht die Wirkung bis in das Unendliche. Da sie jedoch mit zunehmender Entfernung sehr schnell abnimmt (§ 287), braucht man sich nicht weit von der Kugel zu entfernen, um einen Punkt zu erreichen, in dem sich die Wirkung der Kugel nicht mehr bemerkbar macht. — Denkt man sich nun, man habe in einem solchen Punkte die Einheit der positiven Elektrizitätsmenge und die Kugel habe eine gewisse positive Ladung, so müßte man offenbar eine ganz bestimmte Arbeit ausführen, um die positive Einheit nach einem Punkte hin zu verschieben, der der Kugel näher liegt.

Die Arbeit, welche geleistet werden muß, um die Einheit der positiven Elektrizität von einem beliebigen Punkte des elektrischen Feldes in der Richtung nach dem Mittelpunkte der (ebenfalls positiv geladenen) Kugel nach einem anderen Punkte zu verschieben, heißt die Potentialdifferenz für jene beiden Punkte, und die Arbeit, welche geleistet werden muß, um die Einheit der Elektrizität von einem unendlich entfernten Punkte bis auf die Oberfläche der Kugel zu schieben, das elektrische Potential der Kugel. — Es liegt in der Natur der Sache, daß in allen Punkten einer Kugelfläche, die mit der elektrisierten Kugel konzentrisch ist, das Potential dieselbe Größe hat. Eine Fläche, in welcher das Potential überall gleich groß ist, heißt eine Niveaufläche. Die Niveauflächen um eine Kugel sind also Kugelflächen, die mit ihr konzentrisch sind. Je näher die Niveaufläche der elektrischen Kugel liegt, desto größer ist das Potential. Soll Elektrizität von einer äußeren auf eine innere Niveaufläche gebracht werden, so muß Arbeit geleistet werden. Die Bewegung von Elektrizität in einer Niveaufläche erfordert dagegen keine Arbeit. Die elektrische Kraft wirkt nämlich in der Richtung des Radius, also senkrecht zur Niveaufläche, und zur Ausführung einer Bewegung senkrecht zur Richtung der wirkenden Kraft ist keine Arbeit erforderlich. — Auch in dem elektrischen Felde von Körpern, die nicht die Gestalt einer Kugel besitzen, gibt es Niveauflächen, d. h. Flächen, in denen die Bewegung der Elektrizität keine Arbeit erfordert, weil die Richtung der wirkenden Kraft in jedem Punkte der Fläche auf dieser senkrecht steht.

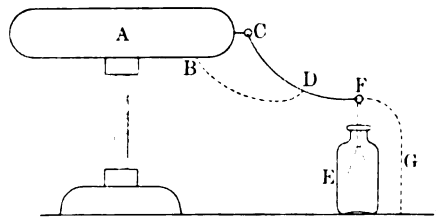
Nimmt man eine Bewegung vor, die nicht in eine Niveaufläche fällt, so kommt man nach einem Punkte mit anderem Potential. Die Potentialdifferenz

Digitized by Google

an zwei dicht nebeneinander (aber nicht in derselben Niveaufläche) liegenden Punkten, dividiert durch den Abstand der beiden Punkte, ist gleich der in dem betreffenden Punkte (in der Richtung der Verbindungslinie der beiden Punkte) wirkenden Kraft. — Dies sieht man leicht ein, wenn man sich erinnert, daß die Potentialdifferenz zwischen den beiden Punkten die Arbeit bedeutet, die geleistet werden muß, um die Einheit der Elektrizitätsmenge von dem einen Punkt nach dem anderen überzuführen. Da nun die Arbeit gleich dem Produkt aus Kraft und Weg ist, so muß die Arbeit (d. h. die Potentialdifferenz) geteilt durch den Weg gleich der Kraft sein, die wir elektrische Spannung nennen wollen.

§ 291. Die Oberfläche eines elektrisierten Leiters muß eine Niveaufläche sein, wenn die Elektrizität auf dem Leiter in Ruhe ist. Die Kraft muß nämlich senkrecht zur Oberfläche wirken, da sich sonst die Elektrizität in der Oberfläche bewegen würde. Das Potential muß also überall auf der Oberfläche des Leiters dasselbe sein. — Wenn zwei gute Leiter durch einen Metalldraht verbunden werden, so nehmen sie dasselbe Potential an, da die beiden Leiter und der Metalldraht zusammen während der Berührung einen einzigen Leiter bilden. Wenn die beiden Leiter auch vor der Berührung dasselbe Potential hatten, so geht keine Elektrizität von dem einen zum anderen über, wenn sie dagegen verschiedenes Potential hatten, so geht von dem Leiter, der das größere Potential hat, positive Elektrizität nach dem anderen Leiter über. Der Potentialunterschied zweier Leiter gibt sich also dadurch zu erkennen, daß eine elektrische Störung stattfindet, wenn die beiden Leiter durch einen Metalldraht verbunden werden. Das Potential eines elektrischen Körpers ist der Unterschied zwischen dem Potential des Körpers und dem Potential der Erde, d. h. eines sog. unelektrischen Körpers.

Fig. 235.



Messung des Potentials.

Wenn A (Fig. 235) ein isolierter Körper ist, so hat er ein gewisses Potential. Dies läßt sich vermittelst des Elektroskops E messen. Zunächst muß man dafür sorgen, daß E dasselbe Potential wie die Erde hat, indem man das Elektroskop durch den Draht G mit der Erde in Verbindung setzt. Dann wird G entfernt und der Leiter A mit dem Elektroskop durch die Leitung CDF verbunden. Das Elektroskop schlägt um so stärker aus, je höher das Potential von A ist. Der Leiter A hat in allen Punkten seiner Oberfläche dasselbe Potential, so daß sich der Ausschlag nicht ändert, wenn zu der Leitung CDF noch die Zweigleitung BD hinzukommt. — Ein anderer elektrischer Körper, der am Elektroskop denselben Ausschlag gibt, hat offenbar dasselbe Potential wie A. Um zu entscheiden, ob das Potential von A positiv oder negativ ist, wenn das Potential der Erde als Null gerechnet

Digitized by Google

wird, hat man nur nötig, zu ermitteln, mit welcher Art der Elektrizität das mit *A* verbundene Elektroskop geladen ist.

§ 292. Zwei Leiter, die durch einen Metalldraht verbunden sind, können mit zwei kommunizierenden Röhren verglichen werden. In diesen steht die Flüssigkeit gleich hoch. In den verbundenen Leitern „steht das Potential gleich hoch". Zwei kommunizierende Röhren brauchen jedoch nicht dieselbe Wassermenge zu enthalten; das eine Rohr kann weit, das andere eng sein. Um das Niveau des Wassers um einen Fuß zu erhöhen, kann in dem einen Rohr vielleicht 100 mal so viel Wasser erforderlich sein, als im anderen Rohr. — Ebenso verhält es sich mit zwei Leitern, die dasselbe Potential haben. Sie brauchen keineswegs dieselbe Elektrizitätsmenge, dieselbe Ladung zu besitzen. Die Elektrizitätsmenge, welche einem Leiter zugeführt werden muß, damit sein Potential um einen gewissen Betrag steigt, hängt in hohem Grade von der Form des Leiters ab. Eine große Kugel erfordert, um auf ein gewisses Potential zu kommen, eine größere Elektrizitätsmenge, als eine kleine Kugel. Wenn der Radius doppelt so groß ist, so muß auch die Ladung doppelt so groß sein, wenn die eine Kugel auf dasselbe Potential geladen werden soll, wie die andere. Wenn die Form des Leiters unregelmäßig ist, so werden die Verhältnisse verwickelter. Unter allen Umständen wird aber bei einem und demselben Leiter das Potential das doppelte, wenn die Ladung die doppelte wird.

Unter der elektrischen Kapazität eines Leiters versteht man diejenige Elektrizitätsmenge, welche dem (isolierten) Leiter zugeführt werden muß, damit er das Potential 1 bekommt. Das Potential 1 hat z. B. eine Kugel vom Radius 1, welche die Elektrizitätsmenge 1 enthält (vgl. § 290). Kennt man die Kapazität und das Potential eines Leiters, so läßt sich auch die Ladung leicht berechnen, denn diese ist gleich dem Produkt aus Kapazität und Potential.

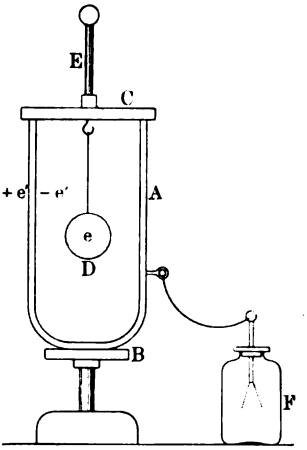
Die Kapazität hängt aber nicht ausschließlich von dem Leiter selbst, sondern auch von der Umgebung desselben ab. Wenn sich in der Nähe elektrische Körper befinden, so wird durch deren Einfluß die Kapazität des Leiters verändert. Was über die Kapazität gesagt worden ist, gilt nur unter der Voraussetzung, daß alle in der Nähe befindlichen Körper in Verbindung mit der Erde stehen. Das Potential der Erde ist immer gleich Null, weil die Kapazität derselben unendlich groß ist.

§ 293. Der Inhalt der letzten Paragraphen besteht in Betrachtungen, deren Grundlage das Coulombsche Gesetz über die Fernewirkung der elektrischen Kräfte bildet. Es würde zu weit führen, wenn wir eingehender verfolgen wollten, von wem und in welchem Zusammenhange diese Resultate erreicht worden sind und in welcher Weise sie sich durch den Versuch bestätigen lassen. Im Anschluß an diese Betrachtungen über die ruhende (statische) Elektrizität soll noch kurz des von Michael Faraday in die Elektrizitätslehre eingeführten Begriffes der elektrischen Kraftlinien gedacht werden. Faraday ging dabei von einem Versuche aus, der eine Abänderung des in § 288 er-

Digitized by Google

wähnten Versuches von Cavendish bildet. *A* (Fig. 236) ist ein Metallgefäß, welches auf einer isolierten Platte *B* steht. Zu dem Gefäß gehört der Metalldeckel *C* mit dem gläsernen Griff *E*. Ein metallener Leiter *D* ist mit einem seidenen Faden an den Deckel angehängt. Faraday gab nun der Kugel *D* eine elektrische Ladung $+e$ und senkte sie dann in das Gefäß. *D* verteilte die Elektrizität in *A*. Die Innenseite des Gefäßes wurde negativ elektrisch und die Außenseite positiv elektrisch. Das Elektroskop *F* schlug also mit positiver Elektrizität aus. Jetzt berührte Faraday *A* ableitend, so daß die positive Elektrizität verschwand und die Blättchen des Elektroskops zusammenfielen. Die negative Elektrizität von *A* wurde von der positiven Elektrizität von *D* festgehalten und wirkte daher nicht auf das Elektroskop. Dann brachte Faraday *A* mit *D* in Berührung, aber trotzdem schlug das Elektroskop nicht aus. Dies beweist, daß die Menge der negativen Elektrizität, die in *A* enthalten war, ebensogroß war, wie die Menge der positiven Elektrizität, die in *D* enthalten war. Hätte *D* mehr positive Elektrizität enthalten als *A* negative, so hätte das Elektroskop mit positiver Elektrizität ausschlagen müssen. Wenn also der verteilende elektrische Körper von dem Leiter, in welchem die Elektrizität verteilt wird, vollständig umschlossen wird, so ist die Menge der durch Verteilung entstandenen Elektrizität ebenso groß wie die Menge der die Verteilung bewirkenden Elektrizität.

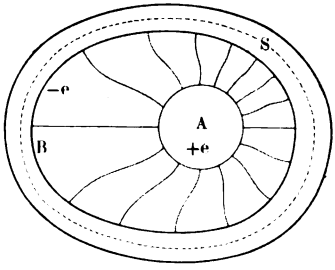
Fig. 236.



Faradays Versuch über die vollständige Verteilung.

Es sei *A* (Fig. 237) ein Leiter mit der Ladung $+e$, und dieser Leiter sei von der Metallschale *B* umschlossen. Dann befindet sich auf der Innenseite von *B* die elektrische Ladung $-e$. In dem Zwischenraum zwischen *A* und *B* wirken elektrische Kräfte, und zwar in der Richtung von *A* nach *B*, denn wenn die Elektrizitätsmenge $+1$ in diesen Raum käme, so würde sie offenbar von *A* nach *B* hin bewegt werden. Der Weg, auf welchem sich die Elektrizitätsmenge $+1$ von einem Punkte auf *A* nach *B* bewegen würde, gibt die Kraftlinie von diesem Punkte nach *B* an. Die Anzahl der Kraftlinien wird nach folgender Regel bestimmt: Die Ladung von *A* sei z. B. $+15$ (also $+e = +15$). Die Oberfläche von *A* wird dann in 15 Teile geteilt, deren jeder die Ladung $+1$ enthält. Von jedem dieser Teile geht eine Kraftlinie nach *B* und der Endpunkt jeder Kraftlinie auf *B* hat die

Fig. 237.



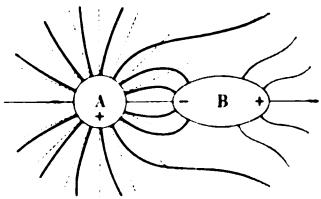
Kraftlinien.

Digitized by Google

Ladung — 1. Die Gesamtladung von B ist also — 15. Natürlich ist in Wirklichkeit die Ladung von B über die ganze Innenseite von B ausgebreitet. Je stärker das „elektrische Feld" ist, desto mehr Kraftlinien enthält es. Nach Faradays Ansicht steht jeder elektrisierte Körper durch Kraftlinien in Verbindung mit einer ebenso großen Ladung von entgegengesetzter Elektrizität.

Im Innern eines Körpers können nur Kraftlinien sein, wenn der Körper ein schlechter Leiter ist. In guten Leitern wirkt ja, wenn die Elektrizität in Ruhe ist, keine elektrische Kraft, also kann es in ihnen auch keine Kraftlinien geben. Von einer elektrisierten Kugel (Fig. 238) gehen die Kraftlinien nach allen Richtungen, wenn keine Leiter in der Nähe sind. Wenn dagegen ein Leiter B in das elektrische Feld von A gebracht wird, so biegen sich einige von den Kraftlinien nach B um, der hierdurch selbst elektrisch und Ausgangspunkt für neue Kraftlinien wird.

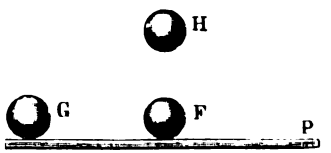
Fig. 238.

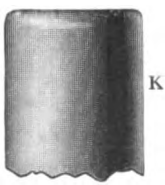


Kraftlinien.

§ 294. Faraday hat durch sein erdachte Versuche nachgewiesen, daß die elektrischen Kräfte durch verschiedene Isolatoren hindurch mit verschiedener Stärke wirken, was bereits Franklin (§ 273) und andere vermutet hatten. Aepinus hatte die elektrische Verteilung als eine reine Fernewirkung angesehen, die unabhängig von dem Stoffe ist, der den Raum ausfüllt, durch den die elektrische Kraft wirkt. Faraday nahm dagegen an, daß die verteilende elektrische Kraft auf die Moleküle dieses Stoffes einwirkt.

Fig. 239.





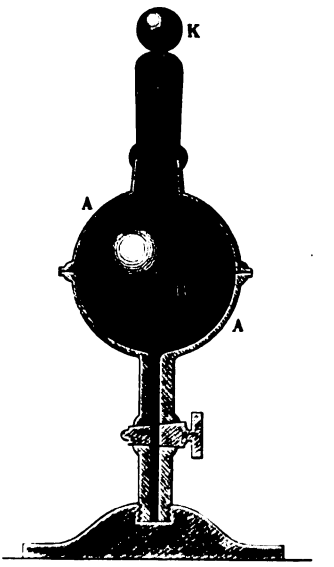
Faradays Versuch über den Verlauf der Kraftlinien.

Zunächst zeigte er, daß die verteilende elektrische Kraft nicht durch gute Leiter hindurch wirkt. Über eine geriebene Siegellackstange K (Fig. 239) wird eine Metallplatte P gehalten, die zur Erde abgeleitet ist. Untersucht man mit einer kleinen Probekugel die Wirkung der verteilenden Kraft in der Umgebung von P, so findet man, daß bei F gar keine Wirkung vorhanden ist, während die Probekugel sowohl bei G als bei H eine elektrische Ladung bekommt. Faraday zog hieraus den Schluß, daß die verteilende Kraft nicht durch die Metallplatte, d. h. durch einen guten Leiter hindurch, aber in krummen Linien um P herum wirkt. Hiermit ist bereits bewiesen, daß die elektrische Verteilung nicht eine reine Fernewirkung ist, sondern daß sie von der Natur des zwischenliegenden Stoffes abhängt. Durch gute Leiter hindurch findet keine Verteilung statt, und in schlechten Leitern ist die Wirkung verschieden, was Faraday durch den in Fig. 240 abgebildeten Apparat nachwies. Derselbe

Digitized by Google

besteht in der Hauptsache aus zwei konzentrischen metallenen Hohlkugeln. Die äußere, *A*, besteht aus zwei Halbkugeln, die innere ist durch einen Metalldraht mit *K* verbunden. Der Draht ist durch Schellack isoliert. Der Zwischenraum zwischen *A* und *B* kann vermittelst eines in der Figur sichtbaren Hahns mit verschiedenen Luftarten oder mit festen Körpern (schlechten Leitern), z. B. Schellack, Schwefel u. s. w., gefüllt werden. Der ganze Apparat ist eine Art Leidener Flasche. Die Metallkugeln entsprechen den Metallbelegungen der Flasche, und der Hohlraum zwischen *A* und *B* entspricht der Glaswand der Flasche.

Fig. 240.



Faradays Versuch über die Verteilung durch verschiedene Körper.

§ 295. Faraday benutzte bei seinen Versuchen zwei Apparate dieser Art, die in allen Einzelheiten so genau wie möglich übereinstimmten. Erst wurde die innere Kugel *B* des einen Apparates geladen und die Spannung derselben mit dem Elektrometer gemessen. Dann wurde zwischen den Knöpfen *K*, also den Kugeln *B* beider Apparate, eine leitende Verbindung hergestellt. Wenn nun der Hohlraum in beiden Apparaten mit demselben Stoff gefüllt war, so verteilte sich die Elektrizität gleichförmig auf beide Apparate. War dagegen der Hohlraum in dem einen Apparate mit Luft, in dem anderen dagegen mit einem anderen Stoffe, z. B. mit Schwefel, gefüllt, so nahmen die beiden Apparate ungleiche Mengen der ursprünglichen Ladung auf. Der Apparat, dessen Hohlraum mit Schwefel gefüllt ist, nimmt (nach neueren Messungen) ungefähr viermal so viel Elektrizität auf, als derjenige, dessen Hohlraum mit Luft gefüllt ist. Beide Kugeln nehmen natürlich dasselbe Potential an, aber sie haben verschiedene Kapazität. Der Apparat mit dem Schwefel hat eine viermal so große Kapazität als der Apparat mit Luft.

Die elektrische Kraft wirkt also offenbar durch Schwefel und durch Luft mit ungleicher Stärke.

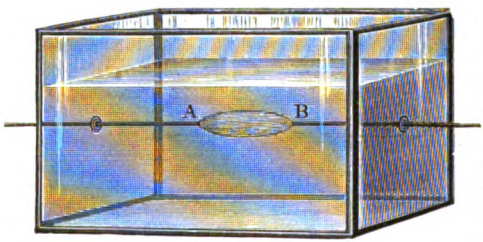
Faraday erklärt die Erscheinung durch die Annahme, daß die Moleküle der Isolatoren durch die Wirkung der elektrischen Kraft eine Veränderung erleiden. Der Vorgang kann nach Helmholtz mit dem Vorgang der Magnetisierung verglichen werden. Ebenso wie man sich vorstellt, daß die Moleküle des Eisens kleine Magnete sind, die durch die Wirkung der magnetischen Kraft „gerichtet" werden, stellt man sich vor, daß die Moleküle eines Isolators durch die elektrische Kraft „gerichtet" werden, indem man sich denkt, daß sie elektrisch „polar", aber nicht „gerichtet" sind, wenn keine elektrische Kraft auf sie

Digitized by Google

einwirkt. Je vollkommener sie „gerichtet" sind, desto kräftiger ist die Wirkung durch den schlechten Leiter hindurch.

Faraday nannte die Isolatoren dielektrische Körper. Daß sich die Teilchen in einer dielektrischen Flüssigkeit wirklich in einer bestimmten Weise anordnen, wenn sich in ihnen die elektrische Kraft fortpflanzt, zeigte er durch den folgenden Versuch. In einem mit Terpentinöl gefüllten Glasbehälter (Fig. 241) standen sich zwei Metallspitzen gegenüber, von denen die eine mit dem positiven, die andere mit dem negativen Konduktor einer Elektrisiermaschine in Verbindung stand. In dem Terpentinöl schwebten zahlreiche kleine Stückchen seidener Fäden. Zwischen den Spitzen pflanzte sich die elektrische Kraft durch die Moleküle des Terpentinöls und der Fadenstücke fort, und die letzteren ordneten sich zwischen den Metallspitzen zu einer Kette an, die dem Zerreißen einen merklichen Gegenstand entgegensetzte.

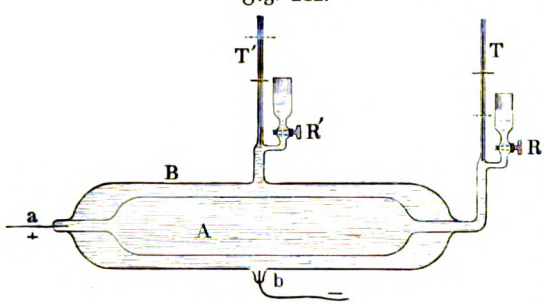
Fig. 241.



Anordnung der Moleküle in einem dielektrischen Körper.

Der französische Physiker Emile Duter machte 1879 einen Versuch, aus dem deutlich hervorgeht, daß sich das Volum eines dielektrischen Körpers ändert, wenn er die elektrische Kraft fortpflanzt. Das Glasgefäß *A* (Fig. 242) wird von dem Glasgefäß *B* umschlossen, und beide Gefäße sind mit einer leitenden Flüssigkeit gefüllt. Bei *a* wird positive und bei *b* negative Elektrizität von den Konduktoren einer Elektrisiermaschine zugeführt. Das Gefäß *A* wird dann wie eine Leidener Flasche geladen, und zugleich steigt die Flüssigkeit im Rohr *T'* und sinkt im Rohr *T*. Das Gefäß *A* wird also während des Ladens größer. Bei der Entladung geschieht das entgegengesetzte, das Volum von *A* vermindert sich.

Fig. 242.



Versuch von Duter.

§ 296. Um die Verschiedenheit in dem Vermögen der Dielektrika, sich molekular-elektrisch ordnen zu lassen, ausdrücken zu können, hat man eine Größe eingeführt, welche die Dielektrizitätskonstante genannt wird. Die Bedeutung derselben ist leicht im Zusammenhang mit den Versuchen zu verstehen, die sich mit dem Faradayschen Apparat (Fig. 240 a. v. S.) anstellen lassen. Wenn man der Dielektrizitätskonstanten der Luft den Wert 1 beilegt, so ist

Digitized by Google

die Dielektrizitätskonstante des Schwefels 4. Wenn der Versuch mit anderen Stoffen angestellt wird, so ergibt sich der Wert für die Dielektrizitätskonstante der betreffenden Stoffe.

Die Dielektrizitätskonstanten der Flüssigkeiten sind von außerordentlich verschiedener Größe, die des Wassers ist z. B. 78, die des Petroleums nur 2. Auch bei festen Körpern ist die Verschiedenheit sehr bedeutend (z. B. Glas 7, Paraffin 2).

§ 297. Wenn ein dielektrischer Körper durch die Wirkung einer elektrischen Kraft „polarisiert" ist und wenn dann die elektrische Kraft verschwindet (z. B. infolge einer Entladung), so hört auch die „molekulare Anordnung" (die Polarisation) in dem dielektrischen Körper auf, und zwar entweder plötzlich (wie in Luftarten) oder nach Verlauf einiger Zeit (wie in festen Körpern). Die Glaswand einer geladenen Leidener Flasche ist ja polarisiert. Wird die Flasche entladen, indem die innere Metallbelegung einen Augenblick mit der inneren durch einen Leiter verbunden wird, so verliert die Flasche ihre Kraft (in der Regel) nicht vollständig. Das Glas bleibt nämlich teilweise polarisiert, indem es sozusagen niemals vollkommen gleichartig ist. Es bleibt noch eine „Restladung" übrig, die eine neue (bedeutend schwächere) Entladung hervorbringen kann. Neuere Untersuchungen haben zu dem Ergebnis geführt, daß keine „Restladung" übrig bleibt, wenn die dielektrische Wand in ihrem molekularen Bau vollkommen gleichförmig, z. B. wenn sie eine Kristallplatte oder eine Flüssigkeit ist. In diesem Falle hat die Entladung eine vollständige molekulare Umordnung durch den ganzen dielektrischen Körper zur Folge.

§ 298. Alessandro Volta, der bereits früher erwähnt worden ist, wurde 1745 in Como geboren. Er entstammte einer angesehenen oberitalienischen Familie und sollte ursprünglich Geistlicher werden. Seiner Neigung entsprach jedoch mehr das Studium der Physik, dem er sich mit großem Eifer zuwandte. Im Jahre 1774 wurde er Professor der Physik in seiner Vaterstadt. Im folgenden Jahre trat er mit seiner ersten interessanten elektrischen Erfindung, dem Elektrophor, an die Öffentlichkeit. Einige Jahre vorher hatte er sich mit seinem gelehrten Landsmann, dem Pater Giacomo Beccaria (1716 bis 1781), der Professor der Physik in Turin war, in einen Streit über die Wirkungsweise der Ladungsflasche eingelassen, und die Abhandlung über das Elektrophor bildete eine der letzten Repliken in diesem Streit. Beccaria hatte die Glasplatte der Ladungstafel (§ 270) durch eine Harzplatte ersetzt, und er experimentierte mit beweglichen Metallbelegungen (§ 273).

Fig. 243.

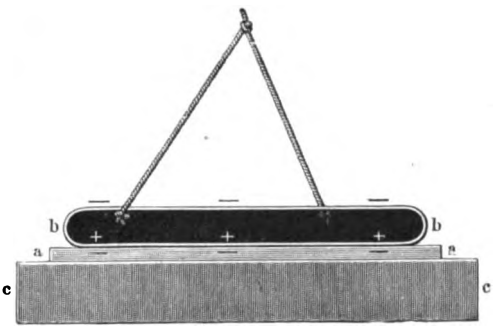
Voltas Elektrophor.

Digitized by Google

Voltas Elektrophor besteht aus einem sog. Harzkuchen (2 Tle. Harz, 3 Tle. Terpentinöl und 1 Tl. Wachs), der in einen Metallteller eingegossen ist (Fig. 243 a. v. S.). Der Kuchen muß eine glatte und blanke Oberfläche haben. Zum Elektrophor gehört ferner ein Metalldeckel, der etwas kleiner ist als der Harzkuchen und der entweder an seidenen Fäden oder an einem gläsernen Stiel festgehalten wird.

Der Elektrophor wird in folgender Weise zur Entwickelung von Elektrizität benutzt. Der Harzkuchen wird durch Reiben mit Pelz, am besten durch „Peitschen" mit einem Fuchsschwanz, negativ elektrisch gemacht. Wird dann der Deckel aufgesetzt, so wird in diesem Elektrizität durch Verteilung erregt (Fig. 244). Berührt man ihn mit dem Finger, so wird die negative Elektrizität abgeleitet und die positive Elektrizität bleibt im Deckel zurück, indem sie von der negativen Elektrizität des Harzkuchens angezogen wird. Hebt man dann den Deckel vom Harzkuchen ab, so enthält dieser freie positive Elektrizität, und man kann mit dem Finger einen Funken ziehen. Dieses Laden und Entladen des Deckels läßt sich beliebig vielmal wiederholen, ohne daß es nötig ist, den Harzkuchen von neuem zu peitschen, weil die Elektrizität des Harzes nicht in den Metalldeckel übergeht, sondern in diesem nur verteilend wird.

Fig. 244.



Verteilung im Elektrophor.

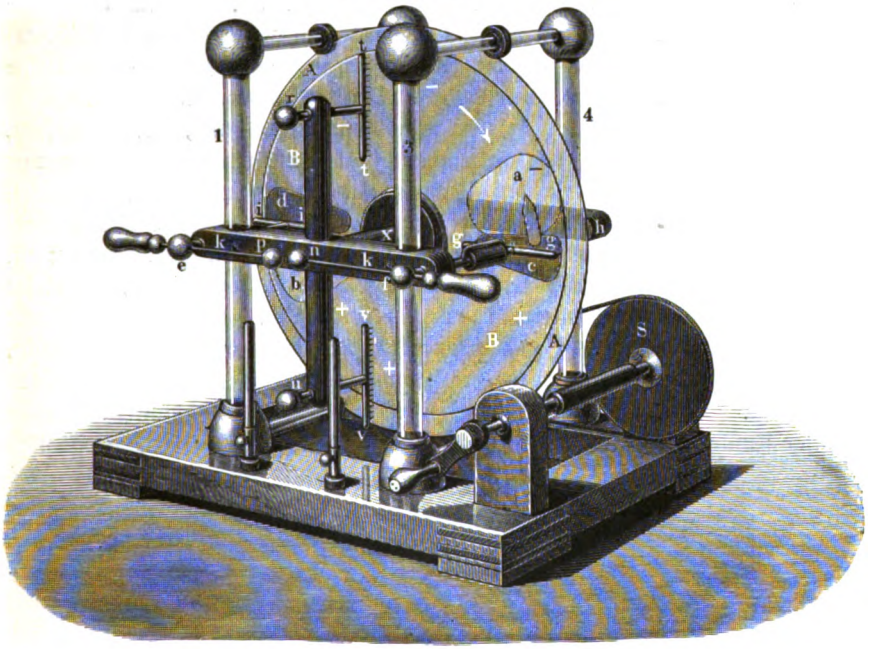
§ 299. Der Elektrophor hat als „Elektrisiermaschine" vor der gewöhnlichen Maschine den Vorzug, daß die Elektrizität ohne Reibung erzeugt wird. Man hat daher auch kontinuierlich wirkende Maschinen gebaut, in denen die Elektrizität durch Verteilung erzeugt wird. Es sind dies die sog. Verteilungsmaschinen, oder, wie sie gewöhnlich genannt werden, Influenzmaschinen. Von den verschiedenen Arten dieser Maschinen, welche heute im Gebrauch sind, ist in Fig. 245 die Holtzsche Influenzmaschine abgebildet. Die Einrichtung der Maschine ist aus der Figur leicht zu ersehen. Von den beiden Glasscheiben *A* und *B* ist die erstere unbeweglich, die letztere um die Achse *x* drehbar. In der Scheibe *A* befinden sich diametral gegenüberstehend die Ausschnitte *a* und *b*, neben denen die Papierbelegungen *c* und *d* aufgeklebt sind. Von jeder dieser beiden Papierbelegungen (Armaturen) ragt ein zugespitzter Streifen von starkem Papier in die Öffnung hinein. Den Papierbelegungen gegenüber stehen vor der beweglichen Scheibe *B* die „Saugkämme" *g* und *i*, deren Stiele in den Kugeln *f* und *e* endigen. Diese Stiele werden von dem Querbalken *k* (aus Hartgummi) getragen. Durch die Knöpfe *f* und *e* gehen zwei verschiebbare

Digitized by Google

Messingstäbe, die in den Kugeln p und n endigen und an Hartgummigriffen angefaßt werden können.

Um die Maschine in Tätigkeit zu setzen, teilt man der Papierbelegung c etwas Elektrizität mit, indem man sie mit einer geriebenen Hartgummischeibe berührt, und dreht dann die Scheibe B in der Richtung des Pfeils, während sich die Knöpfe n und p, die sog. Elektroden, berühren. Die Elektrizität wirkt auf den Saugkamm g verteilend. Die Kugel n wird infolge dieser Verteilung negativ elektrisch. Die positive Elektrizität strömt aus dem

Fig. 245.



Holtzsche Influenzmaschine.

Saugkamm auf die Scheibe, so daß diese nach einer halben Umdrehung positiv geladen dem Saugkamm i gegenüber ankommt. Die positive Ladung wirkt nun einerseits auf die Belegung d und anderseits auf den Saugkamm i verteilend. Infolgedessen wird der Knopf p positiv elektrisch. Die negative Elektrizität, welche aus dem Saugkamm austritt, neutralisiert die positive Elektrizität der Scheibe und macht diese negativ. Dieselbe Wirkung übt die aus der Papierspitze ausströmende negative Elektrizität aus. Die Scheibe kommt also nach einer halben Umdrehung negativ geladen bei g an. Bei fortgesetztem Drehen wird ununterbrochen nach der einen Elektrode positive und nach der anderen negative Elektrizität hingetrieben. An der Berührungsstelle der beiden Kugeln gleichen sich die Elektrizitäten aus, was mit einem zischenden Geräusch verbunden ist. Zieht man die Kugeln auseinander, so

Digitized by Google

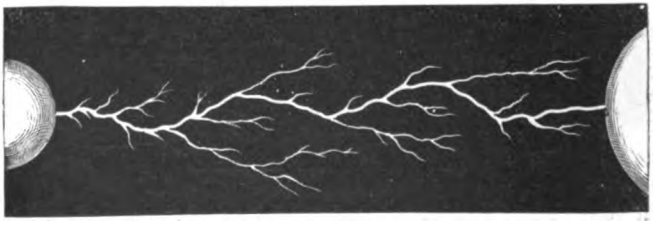
erfolgt der Ausgleich durch den Zwischenraum hindurch in Gestalt eines rauschenden Funkenstromes. Wenn jede der beiden Elektroden mit einer Verstärkungsflasche verbunden wird, so entstehen einzelne stärkere Funken.

Zwei weitere Saugkämme, mit denen die Maschine in der Regel versehen ist (s. Fig. 245) und die mit den beiden anderen (*t* mit *g* und *v* mit *i*) durch Metallbügel verbunden sein müssen, haben den Zweck, das Erlöschen der Maschine zu verhüten, wenn die Elektroden zu weit voneinander entfernt werden.

Die sog. selbsterregenden Influenzmaschinen, zu denen unter anderen die Wimshurstsche Maschine gehört, sind so eingerichtet, daß sie die kleine Menge Elektrizität, welche zur Erregung erforderlich ist, selbst (durch Reibung) erzeugen. Um sie zu erregen, ist es nicht nötig, ihnen zunächst eine kleine Menge Elektrizität, die aus einer anderen Quelle stammt, mitzuteilen.

§ 300. Otto v. Guericke, Dr. Wall und Hawksbee, die, wie gesagt, die ersten waren, welche den elektrischen Funken untersuchten, bekamen nur schwache Wirkungen, da sie den Funken aus schlechten Leitern, Schwefel, Bernstein oder Glas zogen. Da der Funken eine Entladung, d. h. eine Vereinigung von positiver und negativer Elektrizitität zwischen zwei Körpern ist, so kann er bei einem schlechten Leiter nicht sehr kräftig werden, da dieser nur einen Teil seiner Elektrizität auf einmal abgibt. Bedeutend kräftigere Funken erhielten Gralath und Winckler mit Hilfe der Leidener Flasche. Diese entlädt nämlich sozusagen ihre gesamte Elektrizität, wenn ein Funken überschlägt. Auch aus dem Konduktor einer Elektrisiermaschine kann man kräftige Funken erhalten. Gewöhnlich beobachtet man den elektrischen Funken

Fig. 246.



Zickzackförmiger elektrischer Funken.

in der Luft, allein man kann ihn auch in schlecht leitenden Flüssigkeiten und in festen Körpern erzeugen. Kurze Funken sind geradlinig, längere zickzackförmig und so verzweigt, daß die Zweige von dem Körper, der positive Elektrizität abgibt, abgewendet sind (s. Fig. 246). Die Farbe des Funkens ist in verschiedenen Luftarten verschieden. In atmosphärischer Luft ist sie bläulich, in Stickstoff blau, in Sauerstoff weiß, in Wasserstoff rot, in Kohlensäure grünlich. Auch die Metalle, zwischen denen der Funken überspringt und von denen er Partikelchen mitreißt, beeinflussen die Farbe. Je größer die Spannung zwischen den beiden Kugeln ist, zwischen denen der Funken über-

Digitized by Google

springt, desto größer ist die Schlagweite. Diese hängt jedoch außerdem auch in hohem Grade von der Dichtigkeit der Luft ab. In verschiedenen Luftarten ist sie verschieden.

Die Dauer des elektrischen Funkens wurde 1834 von Charles Wheatstone (1802 bis 1875) in London gemessen. Er ließ einen Funken zwischen zwei Kugeln überspringen, die vor einem Spiegel standen, der sehr schnell um eine Achse gedreht wurde, die der Funkenrichtung parallel war. Wenn nun der Funken nur einen Augenblick, d. h. eine unmeßbar kleine Zeit, gedauert hätte, so hätte das Bild desselben als eine helle Linie erscheinen müssen. Dauert dagegen der Funken eine meßbare Zeit, so muß das Bild als ein Lichtband erscheinen, wenn der Spiegel gedreht wird. Wheatstone fand, daß der Funken vom Konduktor einer Elektrisiermaschine nicht eine milliontel Sekunde dauert. Der Entladungsfunken einer Batterie zeigte dagegen ein ganz anderes Verhalten. Bei einem Versuch machte der Spiegel 800 Umdrehungen in der Sekunde, und Wheatstone beobachtete ein 24° breites Lichtband. Die Dauer des Funkens war also diejenige Zeit, welche der Spiegel brauchte, um sich um 12° zu drehen. Der Spiegel brauchte zu einer ganzen Umdrehung $^1/_{800}$ Sekunde, also zu einer Drehung um 12° den 24000. Teil einer Sekunde. Wheatstone untersuchte auch die Dauer des Blitzes und fand, daß sie verschwindend klein im Vergleich mit $^1/_{2000}$ Sekunde ist.

Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist, daß die Entladung eines Kondensators in ganz anderer Weise erfolgt als die Entladung zwischen zwei Leitern (vgl. § 297).

Spätere Untersuchungen von B. W. Feddersen (geb. 1832 in Schleswig) haben gezeigt, daß die Entladung der Leidener Flasche nicht durch einen einzigen Funken, sondern durch eine Reihe aufeinander folgender Funken erfolgt. Feddersen beobachtete die einzelnen Funken in einem schnell rotierenden Spiegel. Aus der Beschaffenheit des Funkenbildes, welches er photographisch fixierte, zog er den Schluß, daß die sehr schnell aufeinander folgenden und an Stärke abnehmenden Funken abwechselnd in der einen und in der anderen Richtung überspringen. Er bezeichnete den Vorgang als oszillatorische Entladung.

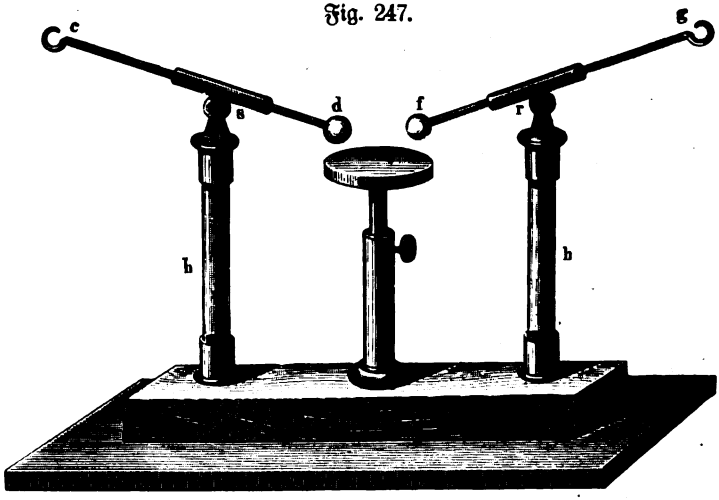
§ 301. Der elektrische Funken, d. h. die elektrische Entladung, besitzt Energie, die sich in verschiedene Formen umsetzt. Bei der Untersuchung der Wirkung kräftiger Entladungen benutzt man in der Regel den von William Henley (Mitglied der Royal Society, gest. 1779) konstruierten Auslader (Fig. 247). Derselbe besteht aus zwei verschiebbaren Messingstäben, zwischen deren Enden, die mit Kugeln oder Spitzen versehen sind, die Funken überspringen. Starke Funken schlagen durch Papier, Glasplatten und andere schlechte Leiter hindurch, und die Wirkung des Funkens ist in diesen Fällen um so stärker, je höher die Spannung ist, welche die Elektrizität besitzt. Die Menge der Elektrizität spielt dagegen keine große Rolle. Die Versuche gelingen am besten mit der Influenzmaschine (§ 299).

Wenn der Funken durch die Luft schlägt, so machen sich verschiedene

Digitized by Google

Wärme- und Bewegungserscheinungen bemerkbar. Man kann durch den elektrischen Funken Weingeist, Schießpulver, Zunder, Phosphor u. dgl. entzünden, und die Luft wird durch den Funken stark erwärmt und ausgedehnt. Zugleich wird die Luft „mechanisch" in Bewegung gesetzt, so daß leichte

Fig. 247.



Henleyscher Auslader.

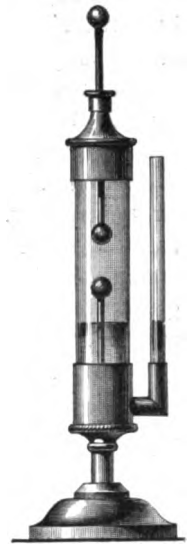
Körper, z. B. Papierschnitzel oder Holundermarkstücke, die sich in der Nähe des Funkens befinden, weggeschleudert werden. Der amerikanische Arzt Ebenezer Kinnersley, ein Freund Franklins, der in den nordamerikanischen Städten Vorträge über den Blitzableiter hielt, veranschaulichte die Wirkung der Entladung auf die Luft durch den in Fig. 248 abgebildeten Apparat (Thermometer). Der Glaszylinder, in welchem der Funken zwischen zwei Kugeln überspringt, ist an beiden Enden geschlossen. Der untere Teil des Zylinders und des seitlichen (oben offenen) Ansatzrohrs ist mit Wasser gefüllt. Wenn die Entladung stattfindet, so dehnt sich die Luft aus und treibt das Wasser in dem Rohr in die Höhe.

Kinnersley fand bei seinen Versuchen mit seinem „Thermometer", daß die Luft durch den elektrischen Funken eine auffallende Veränderung erleidet. Wenn er durch die in seinem „Thermometer" eingeschlossene Luft Funken schlagen und die Luft sich auf die ursprüngliche Temperatur abkühlen ließ, so beobachtete er, daß das Volum der Luft kleiner geworden war, und bei näherer Untersuchung ergab sich, daß sich ein Teil des Stickstoffs der Luft mit dem Sauerstoff zu Salpetersäure vereinigt hatte. Die Entladung hatte also eine chemische Wirkung hervorgebracht. Hierdurch fand eine ältere Beobachtung ihre Erklärung, nämlich daß der Blitz und starke Entladungen der Elektrisiermaschine einen schwefelartigen Geruch erzeugen. Franklin vermutete, daß der Geruch „von etwas in der Luft herrührt, auf das die Elektrizität einwirkt". Schönbein zeigte später (1840), daß der Geruch durch

Digitized by Google

eine eigentümliche Umwandlung des Sauerstoffs erzeugt wird. Er erleidet eine Verdichtung (aus drei Molekülen entstehen zwei) und verwandelt sich in das sog. Ozon. Der Name („riechend") soll andeuten, daß sich diese Art des Sauerstoffs vom gewöhnlichen Sauerstoff durch einen starken (schwefelartigen) Geruch unterscheidet.

Fig. 248.

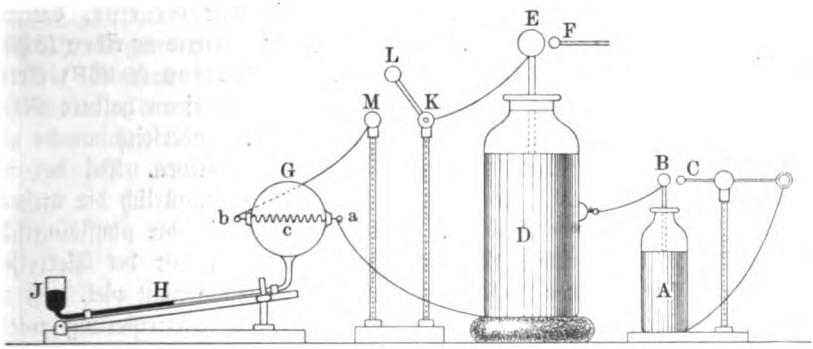


Kinnersleys elektrisches Thermometer.

§ 302. Die Energie, welche sich bei der Entladung geltend macht, ist natürlich in den mit Elektrizität geladenen Körpern enthalten, zwischen denen die Entladung stattfindet. Das Laden eines Körpers mit Elektrizität und die Darstellung der Elektrizität ist mit einem Verbrauch von Energie verbunden. Dies kann man sehr gut an der Influenzmaschine beobachten. Wenn sie Elektrizität liefert, ist sie merklich schwerer zu drehen, als wenn sie läuft, ohne Elektrizität zu liefern.

Professor P. Rieß in Berlin (1804 bis 1883), der 1853 ein großes Werk über Reibungselektrizität herausgab, hat die Energie gemessen, indem er die Entladung durch einen dünnen Platindraht vor sich gehen ließ. Die Elektrizität setzt sich dann sozusagen vollständig in Wärme um. Bei diesen Versuchen wurde eine große Leidener Flasche *D* (Fig. 249) entladen, die selbst durch den Metallstab *F* geladen wird, der nach dem Konduktor einer (in der Figur nicht sichtbaren) Elektrisiermaschine geht. Die Größe der Ladung von *D* wird vermittelst der Laneschen Flasche *A* bestimmt (vgl. § 286). Zum Messen der Wärmeentwicke-

Fig. 249.



Messung der Entladungsenergie.

lung dient das Luftthermometer *GHJ*. Die Luft in der Glaskugel *G* ist durch Quecksilber abgesperrt. Die Enden *a* und *b* der Platindrahtspirale *c* ragen aus der Glaswand, in die der Draht eingeschmolzen ist, hervor. Von *a* geht ein Draht nach der äußeren Belegung von *D*, von *b* ein Draht nach der isolierten Metallkugel *M*. Die innere Belegung von *D* steht, wie aus

Digitized by Google

der Figur zu ersehen ist, in Verbindung mit der isolierten Metallkugel *K*. Durch den drehbaren Metallstab *KL* kann die Verbindung zwischen *K* und *M* hergestellt werden. Wenn dies geschieht, so entlädt sich die Flasche durch die Platinspirale. Die durch die Entladung erzeugte Wärme bewirkt, daß sich die in der Kugel eingeschlossene Luft ausdehnt. Die Größe der Ausdehnung, die an der Quecksilbersäule *HJ* abgelesen wird, bildet das Maß für die im Draht *c* entwickelte Wärme. Rieß fand, daß die durch die Entladung entwickelte Wärme dem Quadrat der elektrischen Ladung proportional ist. Die doppelte Ladung erzeugt die vierfache, die dreifache Ladung die neunfache Wärmemenge u. s. w.

Wenn die Wärmeentwickelung gemessen ist, so kann man die Größe der Kraft berechnen, die während der kurzen Dauer des Funkens wirksam gewesen ist, und man hat das überraschende Resultat gefunden, daß ein starker Funken mehrere hundert Pferdekräfte entwickelt. Im Blitz findet eine unermeßlich große Kraftentfaltung statt. Die elektrische Entladung ist die kräftigste Naturerscheinung, welche man kennt.

§ 303. Geht die elektrische Entladung durch den menschlichen Körper vor sich, so ruft sie gewisse physiologische Wirkungen hervor. Die Entladung ist stets von einer starken Wirkung auf die Nerven und Muskeln begleitet. Die betreffende Person erhält einen „Schlag", der auf die Nerven betäubend wirken kann und der die Muskeln in krampfartige Bewegungen versetzt. Starke Entladungen wirken tödlich (Richmann, § 268). Gralath und Nollet töteten Vögel und andere kleine Tiere durch den elektrischen Schlag der Leidener Flasche. In der Mitte des 18. Jahrhunderts nahm die Heilkunde die Elektrizität in ihren Dienst und suchte namentlich Lähmungen durch Elektrizität zu heilen. C. G. Kratzenstein schrieb 1745 ein Buch über die Anwendung der Elektrizität in der Heilkunde. Er war der erste, der eine Lähmung durch Elektrizität heilte. Im Jahre 1744 kurierte er einen lahmen Finger durch ein halbstündiges Elektrisieren. Dr. Watson (§ 268) elektrisierte 1763 ein vollständig gelähmtes Kind zwei und einen halben Monat lang täglich, und das Kind wurde vollständig geheilt. Anderseits wurde aber auch großer Mißbrauch mit den elektrischen Kuren getrieben. Bei der Anwendung der elektrischen Entladung als Heilmittel ist natürlich die äußerste Vorsicht geboten. Wunderdoktoren, die keine Einsicht in die physiologischen Verhältnisse hatten, wollten alle möglichen Krankheiten mit der Elektrisiermaschine und der Leidener Flasche kurieren. Ja es fehlte nicht viel, daß unwissende Menschen glaubten, man könnte Tote durch Elektrisierung wieder beleben.

Um dieselbe Zeit wurden auch die elektrischen Fische genauer untersucht, von denen der im Mittelmeer lebende Zitterrochen seit den ältesten Zeiten bekannt gewesen war. Früher hatte man geglaubt, die „Schläge", welche der Zitterrochen erteilt, seien mechanischer Natur, also eine Folge sehr kräftiger und schnell aufeinanderfolgender Muskelbewegungen. Als man jedoch die Wirkung der Leidener Flasche kennen gelernt hatte, vermutete man, daß die

Digitized by Google

Schläge, welche der Fisch erteilt, elektrische Entladungen seien. Daß dies wirklich der Fall ist, wurde 1773 von John Walsh (gest. 1795) nachgewiesen. Er erkannte auch, daß der Fisch nur dann einen Schlag erteilen kann, wenn der Rücken mit dem Bauch in leitende Verbindung gebracht wird. — Außer dem Zitterrochen sind noch verschiedene andere Fische, z. B. der Zitterwels und der Zitteraal, mit elektrischen Organen versehen. Das elektrische Organ der Fische besteht aus einer großen Menge von polygonalen Säulchen, die durch eine sehnige, wahrscheinlich isolierend wirkende Membran voneinander getrennt sind. Die Säulchen selbst bestehen aus zahlreichen aufeinandergeschichteten Blättchen, zwischen denen sich eine schleimige Flüssigkeit befindet. Die Blättchen bilden den Sitz der elektrischen Spannung, durch deren Ausgleichung ein elektrischer Schlag entsteht.

Der Sage nach sollen im Altertum die Bewohner der Mittelmeerküsten kranke Kinder in Wasser gebadet haben, in welchem Zitterrochen lebten. Sowohl griechische als römische Schriftsteller wissen von der heilkräftigen Wirkung des Fisches zu erzählen. Man kann also sagen, daß die „elektrische" Behandlung von Krankheiten sehr weit in das Altertum hinaufreicht.

Ebenso findet man seit den ältesten Zeiten Erzählungen von „elektrischen" Personen. Theodorich der Große soll die merkwürdige Eigenschaft besessen haben, daß während des Gehens zuweilen Funken aus ihm herausſprangen, und dasselbe wird von verschiedenen anderen Personen erzählt.

Auch in der neueren Zeit sind derartige Erscheinungen beobachtet worden. Im Jahre 1837 war eine Dame in Nordamerika mehrere Monate lang so stark mit Elektrizität geladen, daß man Funken aus ihr herausziehen konnte. Einer der hervorragendsten Forscher auf diesem Gebiete, Emil Du Bois-Reymond (gest. 1896), hat festgestellt, daß es Personen gibt, die eine Leidener Flasche dadurch laden können, daß sie dieselbe einfach berühren. Elektrische Organe hat man jedoch beim Menschen nicht beobachtet.

Die Untersuchungen über die elektrischen Fische sowie die Anwendung der Elektrizität in der Heilkunde gaben den Anstoß zu einer eifrigen Nachforschung nach elektrischen Erscheinungen bei lebenden Wesen. Man glaubte in allen Lebensprozessen die Wirkung der tierischen Elektrizität zu erkennen.

Digitized by Google

Digitized by Google

Der elektrische Strom.

Digitized by Google

Digitized by Google

Galvanismus.

§ 304. Luigi Galvani (1737 bis 1798), Professor der Anatomie in Bologna, experimentierte, wie alle Professoren der Medizin am Ende des 18. Jahrhunderts, mit Elektrizität und hatte daher eine Elektrisiermaschine in seinem Laboratorium. Im Jahre 1791 gab er seine „Abhandlung über die Kräfte der Elektrizität bei der Muskelbewegung" heraus. Die Beobachtung, welche ihn veranlaßt hatte, die in der Abhandlung beschriebenen Versuche auszuführen, beschreibt er mit folgenden Worten.

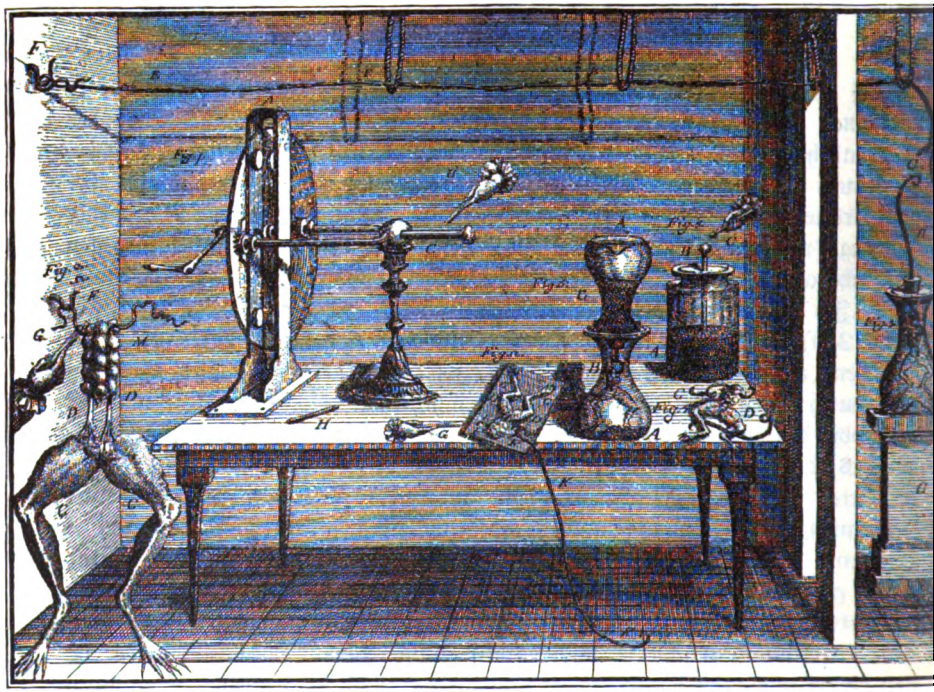
„Ich sezierte einen Frosch und präparierte ihn wie in Fig. 2, Taf. I (Fig. 250), und legte ihn, mich alles anderen versehend, auf einen Tisch, auf dem eine Elektrisiermaschine stand, weit von deren Konduktor getrennt und durch einen nicht gerade kurzen Zwischenraum geschieden. Wie nun der eine von den Leuten, die mir zur Hand gingen, mit der Spitze des Skalpellmessers die inneren Schenkelnerven *DD* des Frosches zufällig ganz leicht berührte, schienen sich alle Muskeln an den Gelenken wiederholt derart zusammenzuziehen, als wären sie anscheinend von heftigen tonischen Krämpfen befallen. Der andere aber, welcher uns bei Elektrizitätsversuchen behilflich war, glaubte bemerkt zu haben, daß sich das ereignet hätte, während dem Konduktor der Maschine ein Funken entlockt wurde. Verwundert über diese neue Erscheinung machte er mich darauf aufmerksam. Daraufhin wurde ich von einem unglaublichen Eifer und Begehren entflammt, dasselbe zu erproben und das, was darunter verborgen wäre, ans Licht zu ziehen."

Galvani wußte selbstverständlich, daß der tierische Körper krampfartige Bewegungen macht, wenn die Elektrizität durch ihn entladen wird. Daß die Elektrizität diese Wirkung hervorbringt, war für ihn also nicht neu. Das neue bei der Erscheinung war, daß die Elektrizität nicht direkt wirkte. Die Elektrizität ging nicht vom Konduktor in das Froschpräparat über, sondern wurde vom Konduktor in einen anderen Körper geleitet. Man war jedoch damals auch mit der verteilenden Wirkung der Elektrizität bekannt (vergl. § 273). Galvani war sich auch darüber klar, daß die Muskelbewegungen durch die Entladung des Konduktors hervorgerufen wurden, allein er hatte keine befriedigende Erklärung für die Erscheinung. Dies veranlaßte ihn, die Einwirkung der Elektrizität auf Muskeln und Nerven gründlich zu untersuchen.

Digitized by Google

Wer die Bewegung des Froschschenkels zuerst beobachtet und Galvani auf die Erscheinung aufmerksam gemacht hat, ist nicht bekannt. Man hat vermutet, daß es Galvanis Gemahlin gewesen ist, die sogar in einem Sonett als die eigentliche Entdeckerin besungen worden ist. Galvani sagt hierüber nichts, und diese ganze Frage bietet auch wenig Interesse, da die erste Beobachtung durchaus keine große Entdeckung war. Diese war nach dem, was man damals über die Elektrizität wußte, nicht schwer zu erklären (vgl. § 305).

Fig. 250.



Galvanis Experimentiertisch.

Die Bedeutung der Beobachtung liegt darin, daß durch sie Galvani zu Untersuchungen angeregt wurde, die zu wichtigen Entdeckungen geführt haben.

§ 305. Galvani fand zunächst, daß die Muskelbewegungen nur dann zu stande kommen, wenn aus dem Konduktor der Elektrisiermaschine Funken gezogen werden, und daß die Größe der Bewegungen sehr wesentlich von der Art und Weise abhängt, wie das Messer angefaßt wird. Das Messer, welches Galvani bei diesen Versuchen benutzte, hatte einen elfenbeinernen Griff. Wurde das Messer an dem (schlecht leitenden) Griffe angefaßt, so waren die Bewegungen schwach. Wurde es dagegen an der Klinge angefaßt, so waren die Bewegungen stark. Wenn Galvani ein trockenes Glasrohr in die Hand nahm und mit diesem den Nerv berührte, so bewegten sich die Muskeln

Digitized by Google

nicht, auch wenn Funken aus dem Konduktor gezogen wurden. Der Versuch gelingt nur, wenn der Nerv mit einem leitenden Körper berührt wird. Noch stärker wurden die Bewegungen, wenn die Muskeln durch einen Draht nach der Erde abgeleitet wurden. In Fig. 250 ist der Experimentiertisch Galvanis abgebildet. Auf demselben liegt der präparierte Frosch, dessen Schenkelmuskel durch den Metalldraht *K* nach der Erde abgeleitet ist und dessen Nerven die Hand *G* ein Messer annähert, während die Hand *B* aus dem Konduktor *C* einen Funken zieht. Links in der Figur befindet sich eine deutlichere Abbildung des Froschpräparates.

Die Wirkung der Entladung auf die Froschbeine ist leicht zu erklären. Der geladene Konduktor wirkt nämlich auf das Präparat verteilend. Die mit der Elektrizität des Konduktors gleichnamige Elektrizität wird durch die Leitung abgestoßen, die entgegengesetzte Elektrizität dagegen wird in den Muskeln und Nerven festgehalten. Wird dann der Konduktor entladen, indem die Hand *B* einen Funken aus ihm zieht, so strömt die abgestoßene Elektrizität wieder zurück. Das Froschpräparat erhält einen elektrischen Schlag (Rückschlag) und macht infolgedessen krampfartige Bewegungen. Wenn das Präparat nicht abgeleitet ist, sondern isoliert auf dem Tische liegt, so findet nur eine schwache Verteilung statt und es erfolgt daher auch nur ein schwacher Rückschlag. Diese Erklärung wurde 1793 von Volta gegeben.

Galvani fand, daß es ganz gleichgültig ist, ob der Konduktor mit positiver oder mit negativer Elektrizität geladen ist.

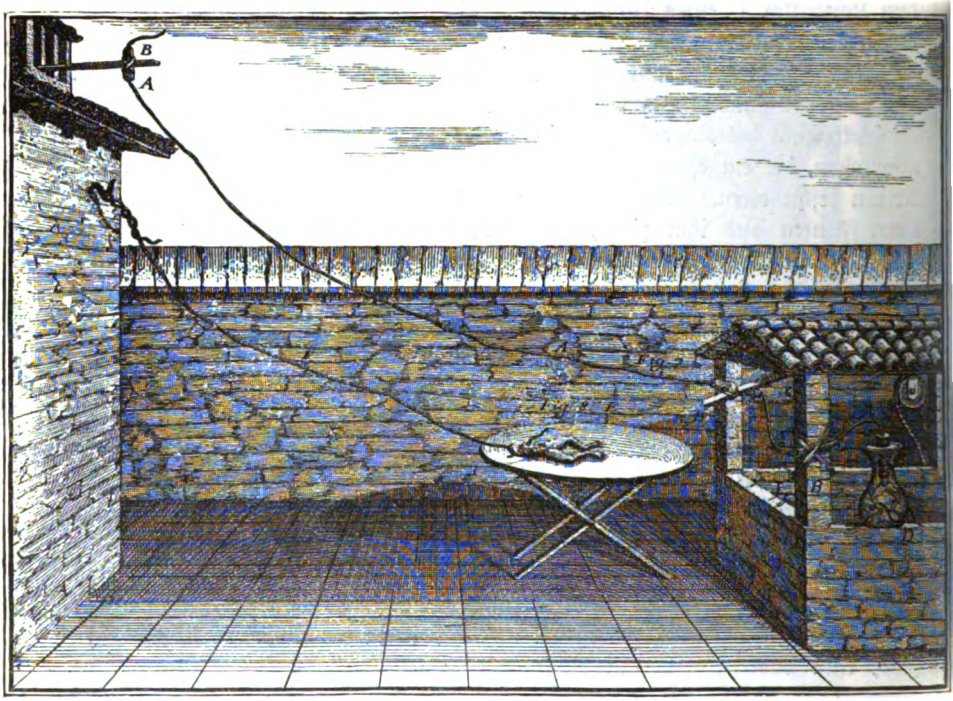
§ 306. Galvani suchte auch festzustellen, ob auch der „natürliche" elektrische Funken, d. h. der Blitz, dieselbe Wirkung hervorbringt, wie die Entladung des Konduktors der Elektrisiermaschine. Das Froschpräparat befand sich in einer Flasche (*D*, Fig. 251 a. f. S.). Von den Muskeln war ein Draht auf das Dach des Hauses hinaufgeführt und von den Nerven ein Draht in einen Brunnen hinabgelassen. Sobald in der Nähe ein Blitz niederfuhr, kam das Präparat in Zuckungen. Ja es zeigten sich auch deutliche Bewegungen, wenn sich der elektrische Zustand der Atmosphäre änderte, ohne daß eine sichtbare Entladung stattfand. Das Froschpräparat war für schwache Veränderungen des elektrischen Zustandes der Atmosphäre viel empfindlicher als die damals bekannten Elektroskope (§ 287). Das Froschbeinelektroskop wirkt allerdings nur, wenn sich der elektrische Zustand der Atmosphäre ändert. Wieviel Elektrizität in der Atmosphäre enthalten ist, zeigt es nicht an.

Eine andere wichtige Beobachtung, die Galvani machte, war die folgende. Die Froschschenkel, an denen sich ein kleines Stück des Rückenmarkes befand (s. Fig. 250 links), hing er vermittelst eines kupfernen Hakens an einem eisernen Balkongeländer auf, und er beobachtete, daß die Muskeln jedesmal in Zuckungen gerieten, wenn sie das Eisen berührten, obgleich in der Elektrizität der Luft keine Veränderung zu bemerken war. Galvani glaubte trotzdem, daß die Erscheinung durch die Luftelektrizität hervorgerufen werde. Diese häufte sich nach seiner Ansicht in dem Tierkörper an, und die Berührung mit dem Eisen bewirkte dann eine kräftige Entladung. Galvani

Digitized by Google

wiederholte die Versuche in seinem Arbeitszimmer, wo das Froschpräparat auf eine Eisenplatte gelegt wurde. Jedesmal, wenn er die Eisenplatte mit dem kupfernen Haken berührte, der durch das Rückenmark gesteckt war, zeigten sich augenblicklich starke Muskelkontraktionen. Hier konnte die Ursache die Luftelektrizität nicht sein, da diese in einem geschlossenen Raume nicht wirkt. Galvani nahm nun als Ursache der

Fig. 251.



Galvanis Versuch mit der Elektrizität der Wolken.

Muskelkontraktionen eine elektrische Entladung an, die erfolgt, wenn die Muskeln und die Nerven durch eine metallische Leitung (Eisenplatte und kupferner Haken) verbunden werden.

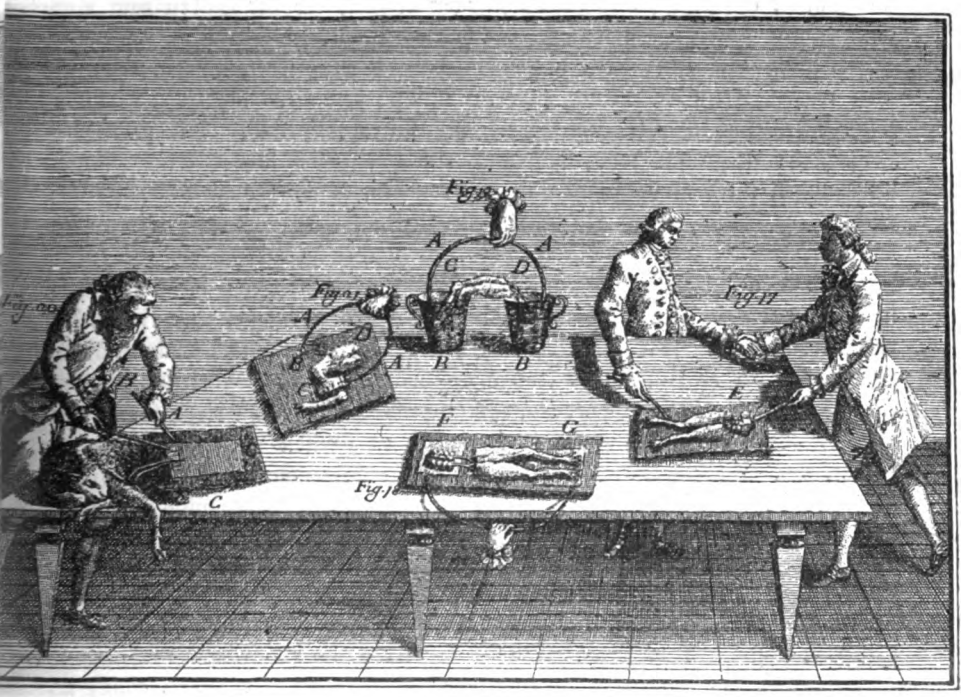
§ 307. Galvani suchte nun die Richtigkeit seiner Annahme dadurch zu beweisen, daß er seine Versuche in verschiedener Weise anordnete, wie aus Fig. 252 zu ersehen ist. Vorn auf dem Tische liegen die Froschschenkel auf einer Eisenplatte. Das entblößte Rückenmark liegt auf einem Stanniolblatt. Man sieht eine Hand, die einen eisernen Bügel hält. Sobald die Verbindung zwischen Muskel und Nerv hergestellt wird, treten Muskelzuckungen ein. Wird die Verbindung durch einen Glasstab hergestellt, so kommt der Muskel nicht in Bewegung.

Rechts in der Figur erblickt man zwei Personen, die sich mit der einen

Digitized by Google

Hand berühren, während sie in der anderen Hand eiserne Stäbchen halten, mit denen der eine den Muskel und der andere den Nerv berührt. Auch hier erfolgten Zuckungen, obgleich in die Leitung zwei menschliche Körper eingeschaltet waren. Der Apparat, dessen Abbildung hinten auf dem Tische sichtbar ist, besteht aus zwei Gefäßen mit Wasser und einem Froschpräparat, welches in das Wasser des einen Gefäßes mit den Muskeln, in das Wasser

Fig. 252.



Verschiedene Versuche Galvanis.

des anderen Gefäßes mit den Nerven eintaucht. Wenn ein Metallbügel mit den Enden in das Wasser beider Gefäße eingetaucht wird, so kommen die Muskeln in Zuckungen. Vorn links wird ein Versuch mit einem warmblütigen Tiere (Lamm) gemacht, der ebenso gut gelang, wie die Versuche mit den Fröschen.

Galvani wurde immer mehr in seiner Auffassung bestärkt, daß es die tierische Elektrizität sei, die bei diesen Versuchen wirkte. Einen Beweis für die Richtigkeit seiner Ansicht glaubte er in der Tatsache zu erkennen, daß die Muskelkontraktionen nur in den Präparaten von frisch getöteten Tieren deutlich waren, in denen die tierische Elektrizität, die natürlich an den Lebensprozeß geknüpft ist, noch vorhanden ist. Er glaubte auch zu bemerken, daß ein dünner Saft von den Nerven nach den Muskeln strömt, solange die

Digitized by Google

Bewegungen anhalten. Ja er machte sich sogar eine bestimmte Vorstellung von der Bedeutung der Muskeln und Nerven für die elektrische Erscheinung. Er glaubte, jede Muskelfaser sei eine kleine Leidener Flasche und die Nerven eien die Leitungen zwischen den beiden Belegungen der Muskelfasern.

Wir wollen nicht näher auf die vielen unklaren und für unsere Zeit wertlosen Betrachtungen eingehen, die Galvani über die Bedeutung seiner Entdeckung für die Heilkunde anstellte. Dagegen wollen wir unsere Aufmerksamkeit auf eine seiner Beobachtungen richten, die für Volta zum Ausgangspunkte für eine Entdeckung von großer Tragweite wurde.

§ 308. Galvani hatte beobachtet, daß die Muskelbewegungen besonders stark waren, wenn die Leitung zwischen Muskel und Nerv aus zwei Metallen, z. B. Eisen und Kupfer oder Eisen und Silber, bestand. Ja, wenn das Froschpräparat so alt war, daß mit einem eisernen Bügel keine Muskelbewegungen mehr hervorgerufen werden konnten, so wurden diese Bewegungen wieder sehr kräftig, wenn der eiserne Bügel ein Stückchen Kupfer oder Silber berührte, welches auf den Muskel oder den Nerven gelegt wurde. Galvani legte jedoch auf diesen Umstand keinen besonderen Wert, da die Erscheinung in der Regel auch beobachtet wurde, wenn bei den Versuchen nur ein Metall verwendet wurde. Für den Arzt Galvani war die tierische Elektrizität die Hauptsache, der er sein ganzes Interesse zuwandte. Die verstärkende Wirkung eines aufgelegten Kupfer- oder Silberblättchens war für ihn Nebensache. Als aber die Versuche Galvanis, die in ärztlichen Kreisen großes Aufsehen erregten, von dem Physiker Alessandro Volta aufgenommen wurden, spielte die Tatsache, daß eine aus zwei Metallen bestehende Leitung zwischen Muskel und Nerv besonders kräftig wirkt, eine wichtige Rolle. Anfangs glaubte auch Volta, daß es sich bei den Versuchen Galvanis um tierische Elektrizität handle, und in einer Abhandlung aus dem Jahre 1793 erklärte er im Gegensatz zu Galvani, die Nerven seien negativ elektrisch und die Muskeln positiv elektrisch.

In derselben Schrift werden die Bedingungen erörtert, unter denen die Versuche am besten gelingen, und es wird besonders hervorgehoben, daß zwei verschiedene Metalle erforderlich sind, wenn die Versuche gut gelingen sollen. Mit Hilfe zweier verschiedener Metalle machte Volta auch eine Anzahl interessanter Versuche über die Wirkung auf den Geschmacksnerven und den Sehnerven.

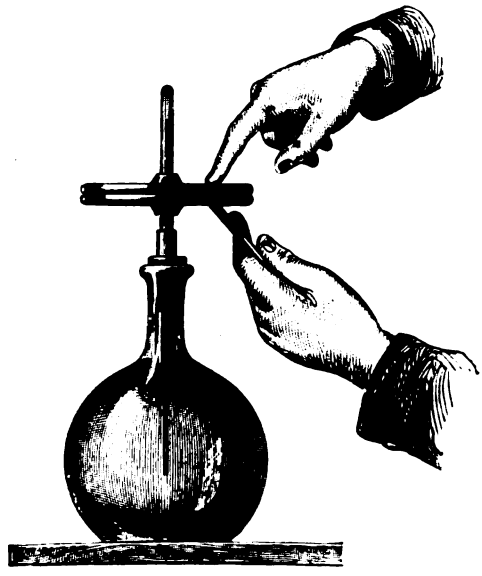
§ 309. Er berührte die Zunge mit einem Blättchen Stanniol und einer Silbermünze, und zwar mit dem ersteren die Zungenspitze, wo der Geschmack am feinsten ist. Wenn er dann das Stanniolblättchen durch einen Metalldraht mit der Silbermünze verband, so empfand er auf der Zungenspitze einen säuerlichen Geschmack, der so lange anhielt, als die beiden Metalle durch den Draht verbunden waren. Wenn er die beiden Metalle vertauschte, so empfand er auf der Zungenspitze nicht einen säuerlichen, sondern einen bitteren und scharfen (alkalischen) Geschmack. Volta ahnte, daß aus dieser Beobachtung wichtige Schlüsse gezogen werden könnten. Es war höchst auf-

Digitized by Google

fallend, daß sich die Geschmacksempfindung bei der Vertauschung der Metalle änderte. Auch den Sehnerven suchte Volta in ähnlicher Weise zu erregen. Er nahm einen silbernen Löffel in den Mund und berührte den Augapfel mit einem Streifen Zink. Wenn er dann die beiden Metalle in Berührung brachte, so empfand er einen Lichtschimmer. Am meisten Aufsehen erregten jedoch seine Versuche mit feuchtem Papier, Leder und Tuch. Wenn er eine Zinkplatte und eine Kupferplatte mit feuchtem Papier in Berührung brachte und dann die Metalle durch einen Zinkstreifen verband, so zeigte sich ein ähnlicher Übergang von Elektrizität wie bei den Versuchen mit organischen Präparaten. Von tierischer Elektrizität konnte aber bei dem Papier selbstverständlich nicht die Rede sein.

§ 310. Volta erblickte jetzt die Quelle der Elektrizitätsentwickelung in der Berührung der beiden verschiedenen Metalle, und im Jahre 1795 teilte er mit, wie sich diese Berührungselektrizität mit Hilfe seines Kondensationselektroskops oder Kondensators nachweisen läßt. Dieses Instrument unterscheidet sich vom gewöhnlichen Elektroskop dadurch, daß der Metallstab, an dem die Goldblättchen hängen, am oberen Ende nicht mit einer Kugel, sondern mit einer Metallplatte versehen ist, auf die eine andere Metallplatte, die mit einem gläsernen Griff versehen ist, aufgesetzt werden kann (Fig. 253). Beide Platten sind mit Schellackfirnis überzogen. Sie bilden also zusammen einen Kondensator. Bevor ein Versuch gemacht wird, werden beide Platten ableitend berührt, damit man sicher ist, daß sie keine Ladung enthalten.

Fig. 253.



Voltas Kondensator.

In welcher Weise Volta das Instrument benutzte, um zu zeigen, daß verschiedene Metalle, z. B. Kupfer (Cu) und Zink (Zn), bei der Berührung entgegengesetzt elektrisch werden, wird durch Fig. 253 veranschaulicht. Die feste Kondensatorplatte besteht in diesem Falle aus Kupfer. Ein Metallstab, der zur Hälfte aus Kupfer und zur Hälfte aus Zink besteht, wird am Zinkende mit der Hand gehalten und am Kupferende mit der festen Kondensatorplatte in Berührung gebracht. Diese bekommt dann dieselbe Spannung wie das Kupfer des Metallstabes. Mit der anderen Hand wird die bewegliche Kondensatorplatte berührt, die also dieselbe Spannung bekommt wie das

Digitized by Google

Zink des Metallstabes. Wenn nun zwischen den beiden Metallen des Stabes ein Spannungsunterschied vorhanden ist, so nehmen die beiden Platten des Kondensators denselben Spannungsunterschied an, d. h. der Kondensator wird geladen. Einstweilen zeigen die Goldblättchen keinen Ausschlag. Wenn aber der Metallstab entfernt und die bewegliche Platte abgehoben wird, so strömt die Elektrizität in die Goldblättchen und diese gehen auseinander.

Volta konnte mit seinem Kondensator, der für dieselbe Ladung denselben Anschlag gab, sehr genau messen, und er fand, daß in den beiden Metallen, welche sich berühren, eine Verteilung stattfindet. Das eine Metall wird positiv und das andere negativ elektrisch, oder besser gesagt, das eine erhält eine höhere elektrische Spannung als das andere. Der Spannungsunterschied, welcher bei der Berührung zustande kommt, ist für die verschiedenen Metalle verschieden. Volta ermittelte durch seine Versuche die folgenden Spannungszahlen:

Zink	12	Eisen	3
Blei	7	Kupfer	1
Zinn	6	Silber	0

Die Bedeutung dieser Zahlen ist die, daß z. B. der Spannungsunterschied zwischen Zink und Kupfer 12 — 1 = 11, zwischen Blei und Eisen 7 — 3 = 4 ist. Der Spannungsunterschied zwischen zwei Metallen, z. B. Zink und Zinn, wird weder erhöht noch vermindert, wenn man zwischen die beiden Metalle eine Anzahl anderer Metalle einschaltet. Wenn z. B. ein Stab aus Zink, Kupfer, Blei und Zinn besteht (Fig. 254), so bleibt der

Fig. 254.

Zink	Kupfer	Blei	Zinn
12	1	7	6

Voltas Spannungszahlen.

Spannungsunterschied zwischen Kupfer und Zinn nach wie vor 6. Jedes Metall hat seine bestimmte Spannungszahl.

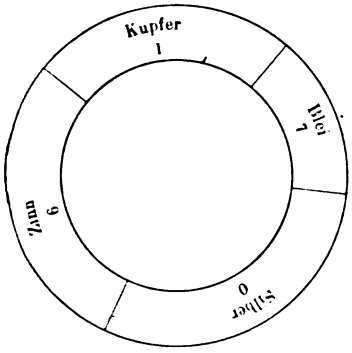
Hieraus folgt, daß man in einer geschlossenen Reihe von Metallen keine dauernde Elektrizitätsentwickelung, sondern nur eine elektrische Verteilung erhält (Fig. 255). Die Spannungsunterschiede sind vorhanden, aber in dem ganzen zusammengesetzten Ringe ist Ruhe.

§ 311. Ein Instrument, welches zum Beobachten und Messen sehr kleiner Elektrizitätsmengen (kleiner Spannungsunterschiede) dient, ist der Verdoppler (Duplikator) von Bennet (Fig. 256), ein Kondensator, der nicht, wie der gewöhnliche Kondensator zwei, sondern drei Metallplatten enthält, eine feste und zwei bewegliche. Die Oberfläche der festen Platte, die beiden Seiten der mittleren Platte und die untere Seite der obersten Platte sind mit einer Firnisschicht überzogen. Die beiden beweglichen Platten sind mit isolierenden Griffen versehen, und die mittlere kann abgeleitet werden, indem

Digitized by Google

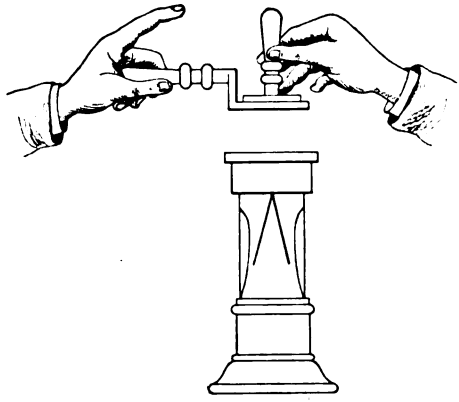
man den Beschlag des Handgriffs mit dem Finger berührt. Der Körper, dessen elektrischer Zustand untersucht werden soll, wird mit der festen Scheibe in Berührung gebracht. Wenn die Ladung sehr schwach ist, so schlagen die Goldblättchen nicht aus. Nun wird die mittlere Platte auf die feste Platte gelegt, ableitend berührt und abgenommen. Sodann wird die oberste Platte auf die mittlere aufgesetzt, ebenfalls ableitend berührt und abgenommen. Die

Fig. 255.



In einem Kreise von Metallen findet keine Elektrizitätsentwickelung statt.

Fig. 256.



Verdoppler von Bennet.

oberste Platte enthält dann dieselbe Elektrizität wie die feste Platte. Jetzt wird die mittlere Platte wieder auf die unterste gesetzt, wodurch die Elektrizität der letzteren gebunden wird. Schließlich wird die oberste Platte mit der untersten in Berührung gebracht. Sie gibt ihre Elektrizität an diese ab und infolgedessen wird in der mittleren Platte noch etwas mehr Elektrizität verteilt. Diese wird jetzt wieder ableitend berührt, abgenommen u. s. w. Auf diese Weise kann die feste Platte mit mehr und mehr Elektrizität geladen werden, und zwar wird die Ladung durch jede Operation annähernd verdoppelt. Die ursprüngliche Ladung ergibt sich dann aus der Anzahl der Operationen, die vorgenommen werden mußten, bis das Elektroskop einen meßbaren Ausschlag gab.

§ 312. Galvani und eine Anzahl anderer Physiker, die wie er die Theorie der tierischen Elektrizität nicht aufgeben wollten, waren inzwischen nicht untätig gewesen. Sie hatten nachgewiesen, daß die Muskeln eines Froschpräparates in Bewegung kommen, wenn sie mit den Nerven ohne Mitwirkung eines Metalles in direkte Berührung gebracht werden. Dies war für sie selbstverständlich ein Beweis dafür, daß die tierische Elektrizität tatsächlich existiert. Galvani und seine Verdienste kamen jedoch alsbald in Vergessenheit, da die Ergebnisse seiner Forschung von den Entdeckungen Voltas in den Schatten gestellt wurden.

Galvani verlebte seine letzten Lebensjahre in bedrängten Verhältnissen. Seinen wissenschaftlichen Leistungen fehlte es an Anerkennung, und als

Digitized by Google

Napoleon 1797 die cisalpiniſche Republik errichtete, zu der auch Bologna gehörte, wurde er ſeines Amtes entſetzt, weil er ſich weigerte, der neuen Regierung den Eid der Treue zu leiſten. Er wurde zwar im folgenden Jahre wieder in ſein Amt eingeſetzt, allein er war inzwiſchen in Schwermut verfallen und ſtarb noch im Laufe desſelben Jahres, ohne ſeine Lehrtätigkeit wieder aufgenommen zu haben.

Fig. 257.

Galvani.

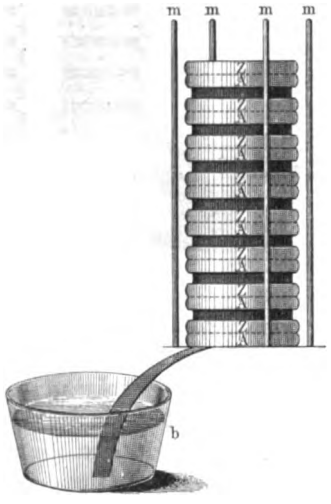
Volta war ſchließlich zu der Überzeugung gekommen, daß im tieriſchen Körper überhaupt keine Elektrizitätsentwickelung ſtattfindet. Durch die Arbeiten ſpäterer Forſcher (Nobili, Du Bois-Reymond) hat jedoch die Anſicht Galvanis, daß in den Muskeln Elektrizitätsentwickelung ſtattfindet, ihre Beſtätigung gefunden. Der Name Galvanis wird jedoch weniger aus dieſem Grunde, als vielmehr deshalb für alle Zeiten mit der Entdeckung der Berührungselektrizität verknüpft ſein, weil Volta im Jahre 1796, alſo bereits zwei Jahre vor Galvanis Tode, der Berührungselektrizität den Namen Galvanismus beilegte, womit er zum Ausdruck bringen wollte, daß die Unterſuchungen Galvanis den Ausgangspunkt für ſeine eigenen Beobachtungen gebildet hatten.

§ 313. Am 20. März 1800 ſchrieb Volta ſeinen berühmten Brief an den Präſidenten der Royal Society, Joſeph Banks, in welchem er mitteilt, daß er eine ſtetig wirkende Elektrizitätsquelle gefunden habe, „einen Apparat,

Digitized by Google

der mit einer schwach geladenen Batterie von Leidener Flaschen verglichen werden kann, der aber die Eigenschaft hat, daß, wenn man ihn entlädt, er sich augenblicklich selbst wieder lädt". — Über die Einrichtung des Apparates schrieb er: „Ich verschaffte mir einige Dutzend runder Kupferplatten, oder was noch besser ist, Silberplatten von ungefähr einem Zoll Durchmesser, und eine ebenso große Anzahl Zinn- oder besser Zinkplatten. Dann schnitt ich aus einem porösen Stoff, der viel Feuchtigkeit aufnehmen und festhalten kann (Pappe, Leder), eine hinreichende Anzahl runder Scheiben. Diese Platten legte ich so aufeinander, daß die Metallplatten immer in derselben Ordnung aufeinander folgten, und daß jedes Plattenpaar von dem folgenden durch eine feuchte Papp- oder Lederscheibe getrennt war."

Fig. 258.



Voltas erste Säule (*A* Silber, *Z* Zink).

Eine solche Voltasche Säule von 20 bis 30 Plattenpaaren gab einen deutlichen Ausschlag am Elektroskop, wenn dieses durch einen Metalldraht mit der obersten oder der untersten Platte in Verbindung gesetzt wurde. Von den beiden Endplatten war die eine positiv und die andere negativ elektrisch. Wenn Volta mit der einen Hand die oberste und gleichzeitig mit der anderen Hand die unterste Platte berührte, so bekam er einen elektrischen Schlag, der Ähnlichkeit mit dem Schlag hatte, den der Zitteraal gibt. Auch darin hatte die Säule Ähnlichkeit mit dem Zitteraal, daß sie wie dieser eine Reihe elektrischer Schläge geben konnte und nicht wie eine Leidener Flasche nach einem einzelnen Schlag entladen war. Volta schlug vor, die Säule ein „künstliches elektrisches Organ" zu nennen.

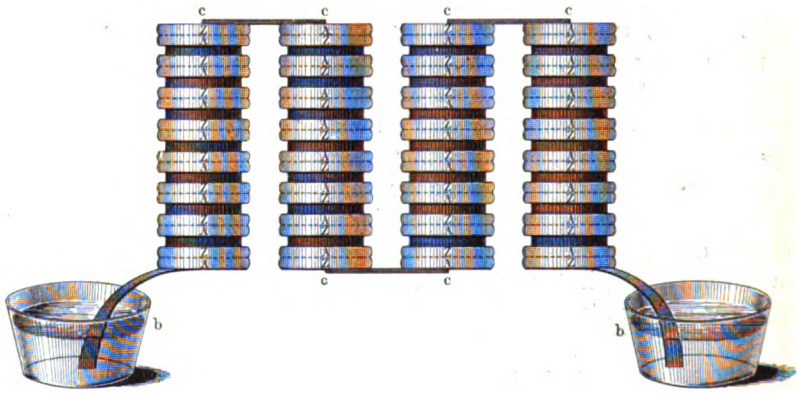
Es war nicht notwendig, daß die Metallplatten genau gleich groß oder gleich dick waren oder daß sie vollkommen glatte Oberflächen hatten. Dagegen war es sehr wesentlich, daß die Metallplatten von den feuchten Scheiben gut benetzt wurden. Zum Befeuchten der porösen Scheiben eignete sich besonders eine Lösung von Kochsalz. Um beim Berühren der beiden Enden oder Pole der Säule einen kräftigen Schlag zu erhalten, mußte man für eine gut leitende Verbindung mit diesen sorgen. Volta ließ daher einen an der untersten Platte angelöteten Metallstreifen in ein Gefäß mit Salzwasser eintauchen (s. Fig. 258). Wenn er eine Hand in das Salzwasser eintauchte und mit der anderen Hand einen Metallstab fest auf die oberste Platte der Säule drückte, so war zwischen den beiden Enden der Säule eine gut leitende Verbindung hergestellt und man bekam einen kräftigen Schlag.

§ 314. Volta teilte zugleich mit, daß die Wirkung der Säule nicht merklich stärker wird, wenn sie aus größeren Metallplatten aufgebaut wird.

Digitized by Google

Dagegen wird die Wirkung durch Vermehrung der Plattenpaare gesteigert. Bei sehr hohen Säulen macht sich aber das Gewicht derselben in unangenehmer Weise geltend, indem aus den porösen Scheiben die Feuchtigkeit herausgepreßt wird. Volta schlug daher in dem erwähnten Briefe vor, die Säule zu teilen (Fig. 259) oder ihr eine ganz andere Form zu geben.

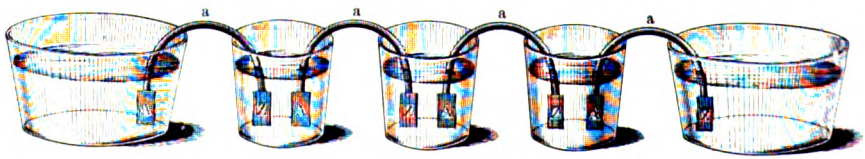
Fig. 259.



Voltas geteilte Säule.

Die Säule in dieser Form ist der sogenannte Becherapparat (Fig. 260). Die Glasgefäße (Becher) enthalten Kochsalzlösung. Eine Anzahl von Silberplatten und Kupferplatten, die paarweise durch Metallbügel verbunden sind, werden so in die Flüssigkeit eingetaucht, daß der eine Endbecher eine Silberplatte, der andere eine Zinkplatte enthält, während jeder der übrigen Becher eine Silberplatte und eine Zinkplatte enthält. Der Becherapparat unterscheidet sich von der Säule nur dadurch, daß die Metallplatten sich nicht unmittelbar berühren, sondern durch einen Metallbügel verbunden sind. Eine unmittelbare

Fig. 260.



Voltas Becherapparat (*A* Silber, *Zn* Zink).

Berührung hätte sich ja allerdings leicht herstellen lassen, wenn man die Verbindung der beiden Metallplatten durch einen Fortsatz der Silberplatte und einen Fortsatz der Zinkscheibe bewerkstelligt hätte. Volta wußte aber, daß der Spannungsunterschied zwischen Silber und Zink durch Einschaltung eines dritten Metalles nicht geändert wird (vergl. § 310).

Der Becherapparat wirkt in jeder Hinsicht ebenso wie die Säule. Die beiden Endplatten besitzen entgegengesetzte Elektrizität, und der Apparat wirkt

Digitized by Google

um so stärker, je größer die Anzahl der Becher ist. Volta fand, daß das Silber durch das billigere Kupfer ersetzt werden kann, ohne daß die Säule wesentlich schwächer wird (vergl. die Spannungstabelle in § 310). Derartige Säulen fanden ausgedehnte Anwendung. Wir wollen daher im folgenden unter einem Voltaschen Element immer die Kombination Kupfer—Flüssigkeit—Zink verstehen.

§ 315. Die Wirkung der Säule erklärte Volta in folgender Weise. Die beiden verschiedenen Metalle, die sich berühren oder durch ein drittes Metall miteinander verbunden sind, bekommen eine ungleiche elektrische Spannung. Wenn die Säule aus Kupfer und Zink besteht, so bekommt die erste Kupferplatte die Spannung 1 und die erste Zinkplatte die Spannung 12 (vergl. § 310). Der Übergang zum nächsten Plattenpaar findet durch die Flüssigkeit in der porösen Scheibe statt, und Volta nahm an, sie bewirke, daß die beiden Metallplatten, welche sie trennt, dieselbe Spannung bekommen. Er betrachtete also die Flüssigkeit als einen passiven Leiter der Elektrizität von einer Platte zur anderen, und hieraus folgte offenbar, daß die nächste Kupferplatte durch ihre Verbindung mit der Flüssigkeit die Spannung 12 bekommt. Die darauf folgende Zinkplatte bekommt dadurch, daß sie die Kupferplatte berührt, eine Spannung, die um 11 höher ist als die Spannung der Kupferplatte. Also ist ihre Spannung $12 + 11 = 23$. In ähnlicher Weise ergibt sich, daß die folgende Zinkplatte die Spannung $23 + 11 = 34$ bekommen muß. Die zehnte Zinkplatte bekommt nach dieser Betrachtung die Spannung $12 + 11.9 = 111$. — Der Spannungsunterschied an den Polen einer Säule mit zehn Plattenpaaren ist also $111 - 1 = 110$, d. h. zehnmal so groß wie der Spannungsunterschied an den Platten eines einzelnen Plattenpaares, $12 - 1 = 11$ (vergl. § 310).

Volta nahm also an, die Elektrizität in der Säule werde ausschließlich durch die Berührung der verschiedenen Metalle erzeugt, und er führte einen neuen Namen ein, um die Ursache der elektrischen Eigenschaften der Säule zu bezeichnen. Wenn sich zwei Metalle berühren, so entsteht an der Berührungsfläche eine elektromotorische Kraft, welche die Elektrizität in den Platten so bewegt, daß ein gewisser Spannungsunterschied erreicht wird, der von der Natur der Metalle abhängig ist. Die Säule selbst nannte Volta ein elektromotorisches Organ.

Volta wies durch Versuche nach, daß die elektromotorische Kraft sowohl eine bestimmte Größe als auch eine bestimmte Richtung besitzt. Er stellte 20 Becher mit Silberplatten und Zinkplatten so in eine Reihe, daß die Silberplatten links und die Zinkplatten rechts standen, und verband jede Zinkplatte mit der Silberplatte des folgenden Elementes. Er hatte also eine galvanische Batterie von 20 Elementen, und diese gab deutliche elektrische Schläge, wenn er gleichzeitig die beiden Pole berührte. — Nun fügte Volta zu diesen 20 Elementen noch 20 Elemente derselben Art hinzu, die sich aber in der entgegengesetzten Stellung (Silber rechts, Zink links) befanden. Diese Batterie von 40 Elementen gab absolut keine Wirkung. Die „Kraft" der

Digitized by Google

einen Reihe von 20 Elementen wurde durch die Kraft der anderen Reihe vollständig aufgehoben. Wurden nun weitere 20 Elemente in der Stellung der ersten 20 Elemente hinzugefügt, so zeigte die Batterie von 60 Elementen wieder starke Wirkung.

Die elektromotorische, d. h. elektrizitätsbewegende Kraft besitzt also eine bestimmte Richtung und sie wirkt, wie bereits erwähnt, zugleich ununterbrochen (konstant). Volta wiederholte mit der Säule die Versuche über die Einwirkung der Elektrizität auf die Sinnesorgane (§ 309). Wenn er den einen Poldraht in die Hand nahm und mit dem anderen die Nasenspitze, das Augenlid oder eine andere empfindliche Stelle der Haut berührte, so empfand er an der betreffenden Stelle ein Prickeln, welches so lange anhielt, als die Leitung geschlossen war. Die dünne empfindliche Haut bildete einen Teil der Leitung zwischen den Polen der Säule, und da diese verschiedene Spannung hatten, so erfolgte die Entladung durch die Haut, was die Empfindung eines eigentümlichen Prickelns zur Folge hatte. Da nun die galvanische Batterie einer schwach geladenen Leidener Flasche zu vergleichen ist, die sich fortwährend von selbst wieder lädt, wenn sie entladen wird, so ist es leicht zu verstehen, daß das Prickeln so lange anhält, als das „elektrische Fluidum" durch die Haut strömt.

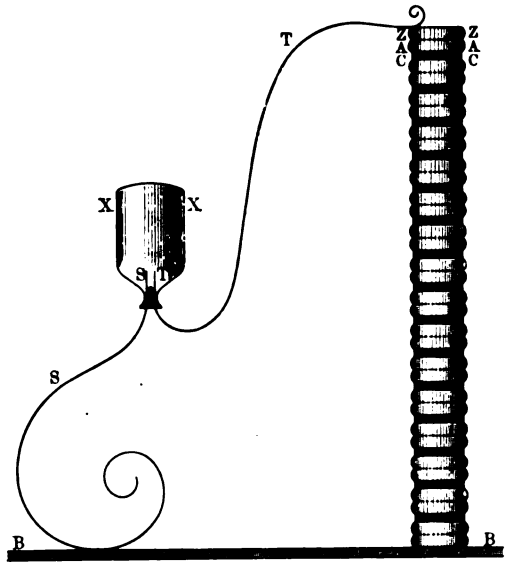
Wir werden alsbald deutlichere Beweise dafür kennen lernen, daß ein ununterbrochener elektrischer Strom zwischen den Polen der Säule geht, wenn diese durch eine metallene Leitung verbunden werden. Wir werden auch erfahren, daß die elektromotorische Kraft ihren Ursprung nicht, wie Volta angenommen hatte, in der Berührung der beiden Metalle hat, sondern in der Berührung der Metalle mit der Flüssigkeit zu suchen ist.

§ 316. Bevor der berühmte Brief Voltas in der Royal Society verlesen wurde, hatte der Präsident verschiedene Personen mit dem Inhalte desselben bekannt gemacht, unter anderen auch Antony Carlisle (1768 bis 1840), der später ein berühmter Chirurg wurde, und dessen Freund, den bereits früher (I, § 203) erwähnten Physiker William Nicholson (1753 bis 1815). Diese beiden Gelehrten experimentierten mit einer Säule, die aus 17 Silbermünzen, ebensoviel Zinkplatten und mit Salzwasser befeuchteten Pappscheiben bestand. Sie beobachteten, daß die Säule elektrisch war, daß sie schwache elektrische Schläge gab u. s. w. Bei einem ihrer Versuche war an die unterste Platte der Säule, die Silberplatte, ein Metalldraht angelötet. Dieser Draht wurde in einen Tropfen Wasser, der auf die oberste Platte, die Zinkplatte, gebracht wurde, eingetaucht. Carlisle beobachtete nun, daß, wenn der Strom in dieser Weise geschlossen wurde, in dem Wassertropfen kleine Gasbläschen aufstiegen, und Nicholson glaubte riechen (!) zu können, daß das Gas Wasserstoff sei. Zur genaueren Untersuchung der Erscheinung diente eine von Landriani in Wien vorgeschlagene Vorrichtung. Die Säule steht auf einer Metallplatte (Fig. 261). Mit dieser, also mit der untersten Platte der Säule, steht der Messingdraht S, mit der obersten Platte der Säule der Messingdraht T in Verbindung. Beide Poldrähte gehen durch den

Digitized by Google

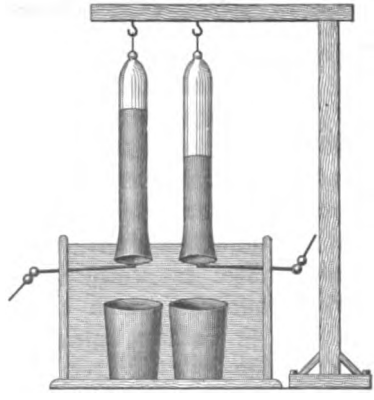
Stopfen der mit dem Halſe nach unten gerichteten und mit Waſſer gefüllten Flaſche *X*. In der Flaſche geht der elektriſche Strom vom Draht *T* nach dem Draht *S* durch die Flüſſigkeit. — Wenn der Strom geſchloſſen wurde, ſo entwickelte ſich am Draht *S* das Gas, welches ſich in der Flaſche anſammelte und ſich bei genauerer Unterſuchung als Waſſerſtoff erwies. Zugleich wurde das in die Flaſche hineinragende Ende des Drahtes *T* oxydiert. Der elektriſche Strom zerlegte alſo das Waſſer in ſeine beiden Beſtandteile, Waſſerſtoff und Sauerſtoff. Der erſtere ſammelt ſich im freien Zuſtande in der Flaſche an, der letztere verbindet ſich mit dem Kupfer und dem Zink, aus denen der Draht beſteht. Beſtehen die Poldrähte aus Platin, welches nicht oxydiert wird, ſo tritt auch der Sauerſtoff im freien Zuſtande auf. J. W. Ritter (ſ. § 318) konſtruierte den in Fig. 262 abgebildeten Waſſerzerſetzungsapparat. Durch die Gefäßwand treten zwei Platindrähte in das Waſſer ein. Die Gaſe, welche bei geſchloſſenem Strom an den Drähten auftreten, ſammeln ſich in zwei mit Waſſer gefüllten Glasröhren an, und zwar, wie in der Figur angedeutet iſt, doppelt ſo viel Waſſerſtoff als Sauerſtoff. Eine neuere Form des Waſſerzerſetzungsapparates iſt in Fig. 263 (a. f. S.) abgebildet. Die Poldrähte ſind mit Platinblechen verbunden, die in die Glasröhren hineinragen. — Die Waſſerzerſetzung zeigt deutlich, daß der elektriſche Strom ſo lange anhält, als die beiden Pole der Säule durch einen Leiter verbunden ſind.

Fig. 261.



Landrianiſche Flaſche.

Fig. 262.



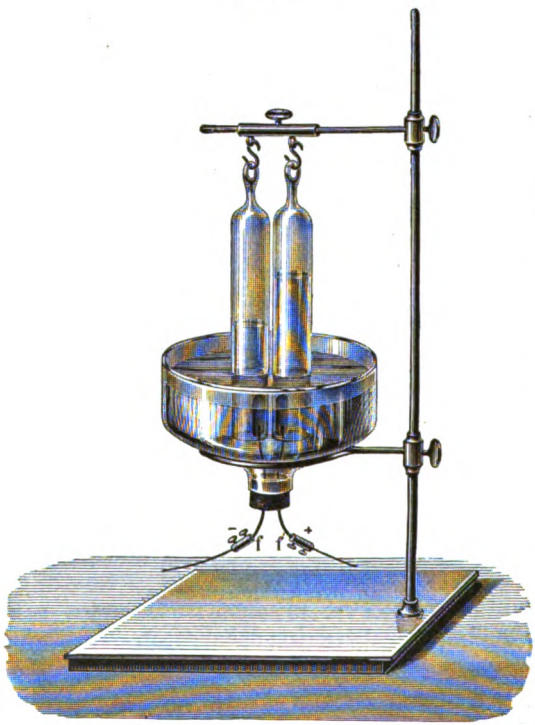
Ritters Waſſerzerſetzungsapparat.

§ 317. Nicholſon und Carlisle konſtruierten auch einen Becherapparat, und ſie beobachteten, daß zwiſchen dem Metall und der Flüſſigkeit etwas vor ſich ging, ſobald die Leitung von einem Pol bis zum anderen geſchloſſen war, alſo ſobald der elektriſche Strom vor-

Digitized by Google

handen war. Sie beobachteten, daß die Zinkplatte oxydiert wurde. Der elektrische Strom geht nämlich nicht nur durch die äußere Leitung zwischen den Polen, sondern er geht auch zugleich in dem galvanischen Element selbst von einer Platte zur anderen durch die Flüssigkeit. Der elektrische Strom geht in einem geschlossenen Kreise, und während er durch das Element geht, zerlegt er das Wasser in seine beiden Bestandteile.

Fig. 263.



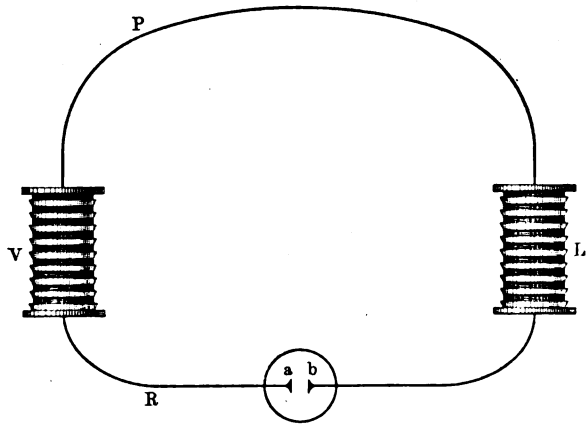
Wasserzersetzungsapparat.

§ 318. Es zeigte sich alsbald, daß nicht nur das Wasser, sondern auch andere Flüssigkeiten durch den elektrischen Strom zerlegt wurden, ja Ritter glaubte aus seinen Versuchen schließen zu können, daß der elektrische Strom auf alle Flüssigkeiten eine zersetzende Wirkung ausübe. Ritter (geb. 1776 in Samitz in Schlesien, gest. 1810 in München), ein Freund Oersteds, beschäftigte sich eingehend mit der chemischen Wirkung des elektrischen Stromes. Von seinen Erfindungen ist namentlich die sogenannte Ladungssäule hervorzuheben. — Ritter ging von einer Beobachtung aus, die Nicolas Gautherot (1753 bis 1803), Musiklehrer in Paris, gemacht hatte, nämlich daß die Platinpole eines Wasserzersetzungsapparates eine elektromotorische Kraft bekommen, wenn eine Zeitlang ein Strom durch den Apparat geht. Wenn der Strom unterbrochen und dann zwischen den Polen eine leitende Verbindung hergestellt wird, so entsteht in dieser ein Strom, was Gautherot erkannte, als er die Leitungsdrähte mit seiner Zunge in Berührung brachte. Ritter fand, daß dasselbe stattfindet, wenn die Pole aus Gold, Silber, Kupfer oder Wismut bestehen. — Sodann legte er eine feuchte Tuchscheibe zwischen zwei Goldmünzen und setzte jede der beiden Münzen mit einem der beiden Pole einer Voltaschen Säule in leitende Verbindung. Es ging also ein Strom von der einen Münze durch die feuchte Tuchscheibe zur anderen Münze. Als jetzt der Strom unterbrochen wurde, zeigte es sich, daß die beiden Münzen nebst der feuchten Scheibe ein galvanisches Element bildeten, und zwar so, daß die

Digitized by Google

Münze, welche mit dem positiven (negativen) Pol der Säule in Verbindung gewesen war, jetzt selbst den positiven (negativen) Pol bildete. Der Strom, der das aus den beiden Münzen und der feuchten Tuchscheibe bestehende Element lieferte, hatte also die entgegengesetzte Richtung wie der Strom der Säule. — Ritter ließ dann durch eine aus Silberplatten und feuchten Tuchscheiben bestehende Säule den Strom einer Voltaschen Säule gehen. Hierdurch wurde die Säule „geladen". Die Platten wurden polarisiert und die Säule enthielt jetzt ebensoviel Elemente, als sie feuchte Tuchscheiben enthielt. Die elektromotorische Kraft der Elemente hatte die entgegengesetzte Richtung wie die Elemente der Voltaschen Säule. Die Ladungssäule ist also eine galvanische Batterie. Sie wird eine sekundäre Batterie genannt, weil sie durch eine andere, die primäre Batterie, erzeugt worden ist.

Fig. 264.



Richtung des Stromes in der Ladungssäule.

Daß die elektromotorische Kraft der sekundären Batterie der elektromotorischen Kraft der primären Batterie entgegengesetzt gerichtet ist, zeigt sich deutlich, wenn man den Strom einer Voltaschen Säule *V* (s. Fig. 264) gleichzeitig durch einen Wasserzersetzungsapparat und die Ladungssäule *L* gehen läßt. Wenn z. B. durch den Strom der Voltaschen Säule bei *a* Wasserstoff und bei *b* Sauerstoff entwickelt wird, so wird umgekehrt bei *a* Sauerstoff und bei *b* Wasserstoff entwickelt, wenn man die Voltasche Säule ausschaltet und die Drähte *P* und *R* miteinander verbindet, so daß jetzt der Strom der Ladungssäule durch den Wasserzersetzungsapparat geht.

Die Ladungssäule liefert indessen nur einen Strom von kurzer Dauer, da ihre elektromotorische Kraft schnell verbraucht ist. Aber wie entsteht die elektromotorische Kraft in der Ladungssäule? Ritter gab selbst eine Erklärung, die aber nicht richtig war. Volta erkannte jedoch, als er von den Versuchen Ritters Kenntnis bekommen hatte, sofort den Zusammenhang. Seine Erklärung war die folgende. Solange ein Strom durch die Ladungs-

Digitized by Google

säule geht, wird das Wasser in den feuchten Tuchscheiben in seine Bestandteile zerlegt. An der einen Metallplatte entwickelt sich Sauerstoff und an der anderen Wasserstoff. Die beiden Oberflächen der Metallplatte werden sozusagen zu einer Sauerstofffläche und einer Wasserstofffläche. Zwischen diesen und dem Metall selbst (und der Flüssigkeit) entstehen elektromotorische Kräfte, die einen Strom erzeugen, der die entgegengesetzte Richtung hat wie der Ladungsstrom. Wenn daher die Voltasche Säule entfernt und zwischen den Endplatten der Ladungssäule eine leitende Verbindung hergestellt wird, so entsteht ein Strom, durch dessen Wirkung an denjenigen Flächen Sauerstoff erzeugt wird, an denen der Strom der Voltaschen Säule Wasserstoff erzeugt hatte, und umgekehrt. Die beiden Gase vereinigen sich zu Wasser, und sobald infolge dieses Vorganges die vorhandenen Gase verschwunden sind, ist die elektromotorische Kraft des sekundären Elementes erschöpft.

Die elektromotorische Kraft der Ladungssäule beweist offenbar, daß diese Kraft nicht, wie Volta anfangs angenommen hatte, ausschließlich durch Berührung von Metallen hervorgerufen wird. Es läßt sich leicht zeigen, daß auch bei der Berührung zwischen einem Metall und einer Flüssigkeit ein Spannungsunterschied entsteht. — Man legt auf die Platte des Elektroskops (Fig. 265) eine Glasscheibe und bringt auf diese einige Tropfen der Flüssigkeit. Wenn dann zwischen der Kondensatorplatte und der Flüssigkeit durch einen Draht, der aus demselben Metall besteht wie die Platte, eine leitende Verbindung hergestellt wird, so findet Verteilung der Elektrizität statt. Die Flüssigkeit wird (in der Regel) positiv und das Metall negativ elektrisch. Wenn der verbindende Metalldraht entfernt wird, gehen die Blättchen des Elektroskops mit derjenigen Elektrizität auseinander, welche das Metall in Berührung mit der Flüssigkeit angenommen hat. Die elektromotorische Kraft hat immer dieselbe Größe, einerlei ob die Berührungsfläche zwischen Metall und Flüssigkeit groß oder klein ist.

Fig. 265.

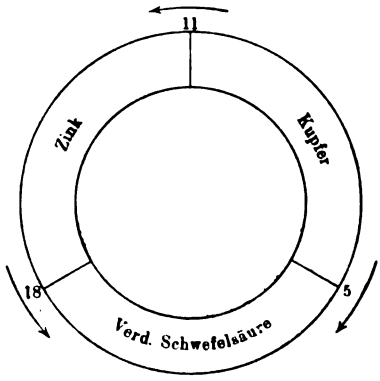
Spannung zwischen Metall und Flüssigkeit.

§ 319. Eine Eigentümlichkeit in dem Verhalten der Flüssigkeiten als Elektrizitätserreger besteht, wie Volta nachgewiesen hat, darin, daß sie sich nicht in die Spannungsreihe der Metalle einordnen lassen. Der Spannungsunterschied zwischen zwei Metallen wird, wie wir früher gesehen haben (§ 309), nicht geändert, wenn zwischen diese beiden Metalle noch andere Metalle eingeschaltet werden. Anders ist es, wenn zwei Metalle durch eine Flüssigkeit getrennt werden. Wir wollen z. B. annehmen, eine amalgamierte Zinkplatte und eine Kupferplatte seien durch verdünnte Schwefelsäure getrennt.

Digitized by Google

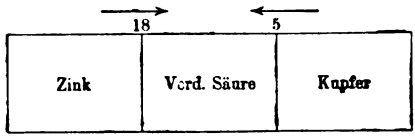
Die elektromotorische Kraft zwischen Zink und Kupfer bezeichnen wir in Übereinstimmung mit § 310 mit 11. Sie wirkt, wie in Fig. 266 durch einen Pfeil angedeutet ist, in der Richtung vom Kupfer zum Zink. Die elektromotorische Kraft zwischen Zink und verdünnter Schwefelsäure ist 18 und wirkt in der Richtung vom Zink zur Flüssigkeit. Die elektromotorische Kraft zwischen Kupfer und verdünnter Schwefelsäure ist 5 und wirkt in der Richtung vom Kupfer zur Säure. In dem galvanischen Ringe (Fig. 266) wirken also drei elektromotorische Kräfte, zwei (11 und 18) in derselben, eine (5) in der entgegengesetzten Richtung. Die resultierende Kraft ist $11 + 18 - 5 = 24$ und wirkt in der Richtung vom Zink durch die Flüssigkeit nach dem Kupfer. Diese elektromotorische Kraft erzeugt in dem Ringe einen elektrischen Strom. Die Richtung dieses Stromes ist die Richtung, in welcher die positive Elektrizität bewegt wird, also die Richtung Zink—Flüssigkeit—Kupfer—Zink. — Denkt man sich den Ring an der Berührungsfläche zwischen Zink und Kupfer geöffnet, so erhält man ein „offenes galvanisches Element" (Fig. 267). Weil hier die Leitung nicht geschlossen ist, kann kein Strom entstehen, aber es entsteht ein Spannungsunterschied (Polspannung) zwischen Zink und Kupfer. Die Größe der Polspannung wird durch die Wirkung der Metalle auf die Flüssigkeit bestimmt. Zwischen dem Zink und der Flüssigkeit wirkt die Kraft 18 in der Richtung des Pfeiles (siehe Fig. 267). Zwischen dem Kupfer und der Flüssigkeit wirkt die Kraft 5 in entgegengesetzter Richtung. Die resultierende Kraft ist also 13 und sie wirkt in der Richtung Zink—Flüssigkeit—Kupfer. Da wir in dieser Entwickelung den elektrischen Spannungsunterschied und die elektromotorische Kraft durch dieselbe Zahl ausgedrückt haben, wird die Polspannung des offenen galvanischen Elementes durch die Zahl 13 ausgedrückt.

Fig. 266.



Ein galvanischer Ring.

Fig. 267.



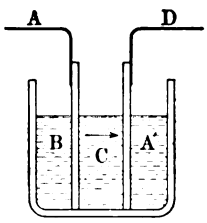
Ein offenes Element.

In Fig. 268 (a. f. S.) ist die von Volta eingeführte Becherform eines solchen Elementes abgebildet. B ist die Zinkplatte, A' die Kupferplatte, A und D sind angelötete Kupferdrähte. — Das Zink bildet den negativen und das Kupfer den positiven Pol, und so entsteht ein elektrischer Strom, sobald die Drähte A und D durch einen leitenden Schließungsbogen in Verbindung gebracht werden. Wenn dies geschieht, so kommen die verschiedenen elektromotorischen Kräfte in Tätigkeit, und die resultierende Kraft, die sogenannte

Digitized by Google

elektromotorische Kraft des Elementes, sendet in der Richtung des Pfeiles (Fig. 268) einen elektrischen Strom durch die geschlossene Leitung. Da der Strom im Element vom Zink durch die Flüssigkeit zum Kupfer geht, geht er in der äußeren Leitung vom Kupfer zum Zink. Das Kupfer bildet den positiven, das Zink den negativen Pol des Elementes. — Wenn man in den Schließungsbogen des Elementes einen Wasserzersetzungsapparat einschaltet, so beobachtet man, daß sich der Wasserstoff am negativen Pol entwickelt („der Wasserstoff geht mit dem Strom"). — Ein galvanisches Element Zink—verdünnte Säure—Kupfer verliert jedoch seine Kraft sehr schnell, weil die Metallplatten polarisiert werden. Der Strom geht ja durch die Flüssigkeit des Elementes von einer Platte zur anderen, und das säurehaltige Wasser zerfällt in Sauerstoff und Wasserstoff. Der Sauerstoff scheidet sich am Zink ab und oxydiert dieses, der Wasserstoff scheidet sich an der Kupferplatte ab. Es entsteht eine elektromotorische Kraft, die die entgegengesetzte Richtung hat wie die ursprüngliche elektromotorische Kraft des Elementes. Der Strom wird durch den entgegengesetzt gerichteten Strom geschwächt und hört alsbald ganz auf. Man hat daher Elemente konstruiert, in denen die Polarisation der Platten verhindert wird. Bevor wir uns jedoch mit diesen konstant wirkenden Elementen bekannt machen, müssen wir uns etwas eingehender mit den chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes beschäftigen.

Fig. 268.



Galvanisches Element.

Die Natur der Stoffe.

§ 320. Die meisten Stoffe in und auf der Erde sind zusammengesetzt, d. h. sie können in ungleichartige Bestandteile zerlegt werden.

Wenn man die Verhältnisse auf der Erdoberfläche betrachtet, so bekommt man einen ganz anderen Eindruck als bei der Betrachtung der Himmelskugel. Sowohl hier wie dort beobachtet man Bewegung, aber die Bewegungen am Himmel verlaufen regelmäßig; eine Zeitperiode löst die andere ab, und dieselben Bewegungserscheinungen kehren in derselben Reihenfolge und in denselben Zeitintervallen wieder. Ganz anderer Art sind die Bewegungserscheinungen auf der Erdoberfläche. Wir finden zwar auch hier große Gruppen von Veränderungen, die sich in regelmäßigem Wechsel vollziehen, vor allen Dingen die Stoffbewegungen, welche an die Jahreszeiten geknüpft sind. Im Frühjahr kommt Leben in die Pflanzen; es entstehen neue Pflanzenteile, die im Sommer eine Entwickelung erreichen, welche entweder im Laufe des Jahres ihren Abschluß findet oder im folgenden Jahre nach einer Ruhepause weiter

Digitized by Google

fortschreitet. Im Herbst fallen Pflanzenteile ab. Diese zerfallen, aus ihren Bestandteilen entwickeln sich neue Stoffe u. s. w. — Diese Stoffbewegungen vollziehen sich wohl mit einer gewissen Regelmäßigkeit, die aber mit der Regelmäßigkeit der Bewegung der Himmelskörper nicht zu vergleichen ist. Wir beobachten auf der Erdoberfläche eine unaufhörlich wechselnde und scheinbar regellose Bewegung. Außer dem Stoffwechsel in den lebenden oder organischen Naturkörpern beobachten wir zahllose Stoffbewegungen in den leblosen oder unorganischen Körpern. Luft und Wasser bewirken Veränderungen der verschiedenen Art, und viele Stoffe wirken so aufeinander ein, daß sie in ihre Bestandteile zerfallen und diese sich zu neuen Verbindungen vereinigen.

§ 321. Die Lebensweise des Menschen wird von diesem Stoffwechsel in hohem Grade beeinflußt. Auf der niedrigsten Entwickelungsstufe begnügt sich der Mensch mit dem, was die Natur bietet. Die Nahrung besteht aus Pflanzenstoffen, und zur Anfertigung der Kleidung, sowie zum Bau der Wohnungen dienen Naturprodukte in ihrem natürlichen Zustande. — Aber der Mensch hat seit den ältesten Zeiten im Feuer ein Mittel besessen, die Naturprodukte in geeigneter Weise zu bearbeiten. Tierische Nahrungsmittel werden mit Hilfe des Feuers zubereitet, und aus den Erzen werden mit Hilfe des Feuers die Metalle gewonnen, aus denen ebenfalls mit Hilfe des Feuers Werkzeuge und Waffen verfertigt werden.

So lernte der Mensch im Laufe der Zeit allerhand Umwandlungen kennen, deren die Naturkörper fähig sind, wenn sie in geeigneter Weise bearbeitet werden. Die Beobachtung dieser Vorgänge war lange Zeit eine rein zufällige und wenig zielbewußte. Aber schließlich erkannte man, daß auch den mannigfaltigen Erscheinungen des Stoffwechsels eine bestimmte Gesetzmäßigkeit zugrunde liegt. Nach langem, planlosem Umhertasten kam man auch auf dem Gebiete der veränderlichen Naturerscheinungen zu einer wissenschaftlichen Forschung. Allerdings mußte die Erforschung der regelmäßig verlaufenden Naturerscheinungen, d. h. der Bewegung der Himmelskörper, vorausgehen.

§ 322. Die Wissenschaft, deren Aufgabe in der Erforschung der Eigenschaften der Stoffe und der Gesetze für die gegenseitige Einwirkung derselben besteht, heißt Chemie. Der Name war bereits im 4. Jahrhundert n. Chr. in Gebrauch und ist wahrscheinlich ägyptischen Ursprungs. „Chemie“ ist der alte Name für Ägypten selbst und bedeutet „schwarz“. Die Griechen und Römer lernten die Chemie tatsächlich als eine ägyptische „Kunst“ kennen.

Die Ägypter besaßen von allen Kulturvölkern des Altertums die meisten Kenntnisse in der Chemie. Sie konnten mit Hilfe des Feuers zahlreiche Umwandlungen der Stoffe hervorbringen, und die ägyptischen Priester besaßen sichere Verfahrungsweisen für die chemischen Arbeiten, allein sie hatten keine Kenntnis von den Ursachen und dem Zusammenhang der Erscheinungen. Die Chemie war bei ihnen eine handwerksmäßige Kunst, die in vielen Einzelheiten einen hohen Grad von Vollkommenheit erreicht hatte. Sie kannten

Digitized by Google

die Metalle Gold, Silber, Kupfer, Eisen und Blei, ebenso die Legierungen des Kupfers mit Zinn und mit Zink, die sogenannten Bronzen, welche zur Anfertigung von Waffen, Werkzeugen und Schmucksachen dienten. Die Ägypter verfertigten Glas, sowohl farbloses als farbiges, und sie brannten Tongefäße mit farbiger Glasur. Sie bereiteten Seife und besaßen zahlreiche Farbstoffe, die fabrikmäßig hergestellt wurden. Die ägyptischen Priester hatten ohne Zweifel chemische Laboratorien, in denen die genannten Stoffe, ferner Heilmittel, Konservierungsmittel, die zum Einbalsamieren der Leichen dienten, und andere Präparate dargestellt wurden. In Mumiengräbern hat man auch die Papyrusrollen mit chemischem Text gefunden, die in der Bibliothek zu Leiden aufbewahrt werden. Von den Ägyptern haben die übrigen Mittelmeervölker die „Verwandlungskunst" gelernt, erst die Phönizier und die Israeliten und später die Griechen, und die griechischen Weisen haben während ihres Aufenthaltes in Ägypten sicher auch auf diesem Gebiete von den Priestern gelernt.

§ 323. Die chemische Kunst fand bei den Griechen keine experimentelle Weiterbildung. Was die griechischen Weisen in Ägypten lernten, diente ihnen als Ausgangspunkt für eine Spekulation über die Natur der Materie im allgemeinen.

Die alten griechischen Philosophen suchten das Wesen der Dinge durch die Annahme zu erklären, daß ein Grundstoff existiert, aus dem das ganze Weltall aufgebaut ist.

Thales von Milet nahm an, dieser Urstoff sei das Wasser. Diese Anschauung stammte selbstverständlich von den älteren Kulturvölkern, deren gesamte Kultur an die befruchtende Wirkung des Wassers der großen Flüsse, des Hoangho, des Euphrat, des Ganges, des Nils, geknüpft war. Die Ansicht, daß das Wasser der Urstoff sei, beruhte auf der Wahrnehmung, daß das Wasser für den Stoffwechsel in den organischen Naturkörpern notwendig ist. Man mußte jedoch alsbald zu der Überzeugung kommen, daß die Wahl des Wassers als Urstoff eine ziemlich willkürliche war. Anaximander (610 bis 545 v. Chr.), der Nachfolger Thales' in der jonischen Schule, verwarf daher das Wasser als Urstoff und setzte an dessen Stelle einen unbestimmten Stoff. Anaximenes (um 550 v. Chr.) dagegen erblickte den Urstoff in der Luft. „Wenn die Luft verdichtet wird, so entsteht Wasser und Erde, und wenn die Luft verdünnt wird, so entsteht Feuer; also entstehen alle Stoffe aus Luft." — Hier erkennen wir den Anfang der Lehre von den vier Elementen, Luft, Wasser, Feuer und Erde, allein das bloße Greifen nach einem Prinzip für die Natur der Materie führte zu keiner wirklichen Erkenntnis.

Dasselbe gilt von den mathematischen Spekulationen der Pythagoräer. Nach ihrer Meinung kommen im Bau des Weltalls die fünf regelmäßigen Körper zum Ausdruck. Die Luft besteht aus Oktaedern, das Wasser aus Ikosaedern, das Feuer aus Tetraedern und die Erde aus Hexaedern. Der fünfte regelmäßige Körper, das Dodekaeder, mit den vielen harmonischen Beziehungen seiner Fünfecke, war das Symbol des Weltalls. Für die Spekulation war hier ein weites Feld, aber selbst die genialsten Betrachtungen auf

Digitized by Google

diesem Gebiete bleiben unfruchtbar, wenn sie nicht durch die Naturerscheinungen bestätigt werden. Eine recht deutliche Vorstellung hiervon bekommt man, wenn man die Vorstellungen Anaxagoras' und Demokrits mit den heutigen Ansichten über die Beschaffenheit der Materie vergleicht.

Anaxagoras (um 450 v. Chr.) stammte aus Klazomenae in Kleinasien, wirkte aber vorzugsweise in Athen. Zu seinen Schülern und Freunden gehörten Sokrates, Perikles und Phidias. Er wurde der Gottlosigkeit beschuldigt, weil er erklärt hatte, die Sonne sei ein glühender Stein, der größer sei als der Peloponnes, und er entging der Todesstrafe nur deshalb, weil sich Perikles für ihn verwendete. Von seinem Buche „Über die Natur" sind einzelne Bruchstücke erhalten. Er erklärt es für einen Irrtum, wenn man glaube, der Stoff könne geschaffen oder vernichtet oder „verwandelt" werden. Alle Vorgänge in der Natur bestehen im Austausch, in der Vereinigung und der Trennung der einzelnen Stoffe. Alle Dinge bestehen aus unsichtbaren Teilchen, die unveränderlich und in unendlicher Anzahl vorhanden sind. Sie unterscheiden sich voneinander durch Form, Farbe und Geschmack. Ursprünglich lagen diese Teilchen regellos durcheinander. Aus ihnen entstand die Welt durch das Hinzutreten des „Geistes" (d. h. des bewegenden Prinzips), durch das Ordnung und Gesetzmäßigkeit in der materiellen Welt die Herrschaft gewann.

Deutlicher spricht sich über diese Frage ein Zeitgenosse des Anaxagoras, Demokritos von Abdera, aus. Er war, nach den Berichten der Alten zu urteilen, ein weitgereister Mann, der sich auf seinen Reisen umfangreiche Kenntnisse erworben hatte. Nach seiner Rückkehr schrieb er zahlreiche Bücher. Er stand bei seinen Zeitgenossen in hohem Ansehen, und als er, 100 Jahre alt, gestorben war, wurde er auf öffentliche Kosten begraben. Einen großen Einfluß hat sein Lehrer Leukippos auf ihn ausgeübt, der auch an der Begründung der von Demokrit aufgestellten Atomenlehre einen wesentlichen Anteil genommen hat. Nach dieser Theorie besteht die Welt aus dem leeren Raum und aus unendlich vielen unsichtbaren, unvergänglichen und unteilbaren kleinen Körperchen, den Atomen (atomos ist ein griechisches Wort und bedeutet „unteilbar"). Diese Atome haben verschiedene Gestalt. Wenn sie sich vereinigen, so entsteht ein Stoff, und wenn sie sich wieder voneinander trennen, so zerfällt ein Stoff. Die Veränderungen in der materiellen Welt sind also gleichbedeutend mit Atombewegungen, und die Ursache der Bewegung ist nach Demokrit eine Kraft, die die Atome selbst besitzen.

Demokrit betrachtet ebenso wie Anaxagoras den Stoff als unvergänglich und seine Menge als unveränderlich, aber er nimmt im Gegensatz zu Anaxagoras an, daß die Atome nur der Form nach verschieden sind. Indem Demokrit die zwischen den Atomen wirkende Kraft als etwas auffaßt, was zu der Natur der Atome selbst gehört, nähert er sich der modernen Auffassung, daß die „Kraftmenge" (oder Energiemenge) trotz der Veränderungen in der materiellen Welt unveränderlich ist.

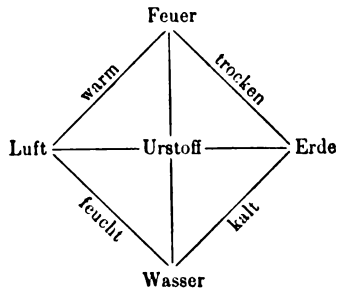
Demokrits Atomenlehre ist ein glänzendes Beispiel dafür, was die

Digitized by Google

Griechen durch klares Denken zu leisten vermochten. Er hat eine Theorie aufgestellt, die durch die experimentelle Forschung unserer Tage bestätigt worden ist. Aber die Geschichte dieser Atomenlehre zeigt uns zugleich, daß selbst das stolzeste Gedankengebäude nicht zum Leitstern für die Naturwissenschaft wird, wenn dies Gebäude nicht auf einer durch Versuche festgestellten Grundlage ruht. Demokrits Atomenlehre ist zunächst nicht zum Wegweiser für diejenigen geworden, die die Natur der chemischen Vorgänge aufzuklären versuchten. Nur bei den Philosophen lebte die Lehre weiter, aber diese haben auf die Entwickelung der Chemie keinen nennenswerten Einfluß ausgeübt.

§ 324. Eine Weiterbildung fand die von den Chaldäern stammende Lehre von den vier Elementen durch Aristoteles, den großen Systematiker des Altertums. Den leeren Raum kannte Aristoteles nicht. Er nahm vielmehr an, der ganze Raum sei von Stoff erfüllt. Der Urstoff, sagt er, ist eigenschaftslos, dagegen sind die vier Elemente Feuer, Luft, Erde und Wasser die Träger der vier Eigenschaften warm, kalt, trocken und feucht. Das Feuer (Fig. 269) ist warm und trocken, die Luft warm und feucht, die Erde trocken und kalt, das Wasser feucht und kalt. Die Elemente können ineinander übergehen. Entzieht man der Luft die Wärme, so wird sie zu Wasser, führt man der Erde Wärme zu, so wird sie zu Feuer u. s. w. Aus Feuer, Luft, Erde und Wasser bestehen alle Stoffe, und die Elemente können durch Zerlegung der Stoffe dargestellt werden. Die Elemente selbst können nicht zerlegt werden. — Die Chaldäer hatten ein fünftes Element, den Äther, der alle Körper durchdringt. Auch Aristoteles nahm den Äther in sein System auf. Die Erde, sagte er, ist das schwere Element, das Feuer ist das leichte; dazwischen liegen das Wasser und die Luft, Stoffe, welche vorwiegend das schwere Element enthalten, streben abwärts zur Erde, Stoffe, die vorwiegend das leichte Element enthalten, dagegen aufwärts zum Himmel, der aus dem fünften Element (quinta essencia), dem Äther, besteht.

Fig. 269.



Die vier Elemente.

Körper, die schwerer als Wasser sind, enthalten nach Aristoteles Erde; Körper, die leichter sind, enthalten Luft; brennbare Körper enthalten Feuer u. s. w. In der Regel besteht ein Stoff aus mehreren Elementen, die zu einer Einheit verschmolzen sind, ähnlich wie die Buchstaben einer Silbe zu einem Ganzen verschmelzen. Die einzelnen Stoffe sind nicht wesentlich voneinander verschieden, sondern bestehen aus denselben Elementen. Ein Stoff kann dadurch in einen anderen übergehen, daß er eines seiner Elemente gegen ein anderes austauscht. Ein ausgezeichnetes Mittel, durch welches diese Umwandlungen bewirkt werden können, ist das Feuer (die Wärme). Die Vorgänge des Schmelzens, des Gefrierens, des Verdampfens und des Verdichtens gehören

Digitized by Google

zu denjenigen Umwandlungen, die leicht nach Fig. 269 zu erklären sind. Erde wird zu Wasser, wenn die Trockenheit mit Feuchtigkeit vertauscht wird, das Wasser wird zu Luft, wenn die Kälte durch Wärme ersetzt wird u. s. w.

§ 325. Als Alexandria der Hauptsitz der griechischen Wissenschaft geworden war, wurden die Griechen auch nach und nach mit den chemischen Künsten bekannt. Das alexandrinische Museum stand in enger Verbindung mit der ägyptischen Priesterschaft, und die altägyptische Kultur wurde von den Gelehrten des Museums eifrig studiert. — Auf dem Gebiete der Chemie, der Verwandlungskunst, beschäftigte man sich besonders eifrig mit der Metallverwandlung. Die Ägypter hatten gefunden, daß man durch Zusammenschmelzen von zwei Metallen neue Metalle erhält, die zuweilen von den ursprünglichen Metallen sehr verschieden sind. Sie hatten ferner beobachtet, daß anscheinend gleichartige Kupfererze beim Ausschmelzen sehr verschiedenartige Metalle liefern konnten. Es hatte den Anschein, als ob während des Schmelzprozesses Umwandlungen vor sich gingen. Eine Tatsache, die den Alten bekannt war und die sie in dem Glauben an die Möglichkeit der Metallverwandlung bestärkte, war die, daß man aus Blei durch Schmelzen an der Luft zuweilen ein Silberkorn erhält. Für den, der keine Ahnung davon hatte, daß das Silber auch vor der Bearbeitung des Bleies in diesem enthalten war, sondern der in dem Glauben an die umwandelnde Kraft des Feuers befangen war, war aber ein derartiger Vorgang von großer Bedeutung, namentlich da es sich bei demselben um die Verwandlung eines unedlen Metalles in ein edles handelte. Was das Gold betrifft, so wußte man, daß ein Mineral von goldartiger Farbe (Auripigment) beim Verbrennen zuweilen eine kleine Menge Gold hinterläßt.

Die Lehre von der Metallverwandlung ist alt. Sagen, die im 3. Jahrhundert n. Chr. aufgezeichnet worden sind, berichten, Hermes Trismegistos sei derjenige gewesen, der die Menschen zuerst die Verwandlungskunst lehrte. Unter diesem Hermes, nach dem die Chemie den Namen „hermetische Kunst“ erhielt, ist wahrscheinlich Thoth, der ägyptische Gott der Wissenschaft, zu verstehen. Hermes soll der Sage nach viele Bücher über die Metallverwandlung geschrieben haben, und es existiert immer ein Kreis besonders auserwählter Menschen, die in seine Offenbarungen eingeweiht sind.

Bei den Griechen fand der Glaube an die Möglichkeit der Metallverwandlung leicht Eingang, nicht nur wegen der materiellen Vorteile, welche die Lösung des Problems im Gefolge haben mußte, sondern auch deshalb, weil die altägyptischen Überlieferungen mit der Lehre des Aristoteles vollkommen in Einklang standen. Aristoteles hatte ja ausdrücklich hervorgehoben, daß ein Stoff durch Einwirkung des Feuers oder eines anderen Elementes in einen anderen Stoff verwandelt werden kann. Der Urstoff war allen gemeinsam, nur die Mischung der Elemente war verschieden. — In wissenschaftlicher Hinsicht war also gegen die Lehre von der Metallverwandlung nichts einzuwenden. Sie ging von den Griechen zu den Arabern

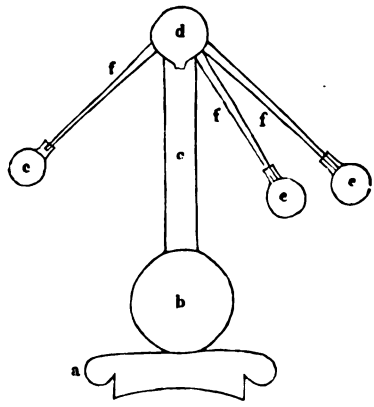
Digitized by Google

und von diesen zu den westeuropäischen Völkern über und hat sich das ganze Mittelalter bis in die neuere Zeit hinein erhalten.

§ 326. Was nun die praktische Ausführung der Metallverwandlung betrifft, so konnte in dieser Hinsicht kein anderer Weg in Frage kommen als der des Versuches. Es begann daher ein umfangreiches, aber im höchsten Grade planloses Experimentieren. Man hatte keine sichere Richtschnur. Die aristotelische Lehre gab keine Anweisung. Besser waren jedenfalls die ägyptischen Vorschriften, namentlich diejenigen, welche den Gebrauch der Wärme (des Feuers) bei chemischen Operationen betrafen.

Wir besitzen Berichte aus dem 4. und 5. Jahrhundert n. Chr. über chemische Apparate und Arbeitsmethoden. Namentlich von drei Alexandrinern, Zosimos von Panopolis, Bischof Synesios von Ptolemais und Olympiador, genannt „Operator", besitzen wir Berichte über den Vorgang, den wir heutzutage Destillation nennen.

Fig. 270.



Alexandrinischer Destillierapparat.

In Fig. 270 ist ein alexandrinischer Destillierapparat abgebildet. Der Behälter *b* besteht aus gebranntem Ton und ist durch das Metallrohr *c* mit dem Glasbehälter *d* verbunden. Von diesem führen die drei Metallröhren *f* zu den drei kleineren Glasbehältern *e*. Die Röhren sind luftdicht in die Behälter eingekittet. Wenn nun eine Flüssigkeit in den Behälter *b* gebracht und dieser erhitzt wird, so verdampft die Flüssigkeit und die Dämpfe verdichten sich in den kalten Behältern *e*.

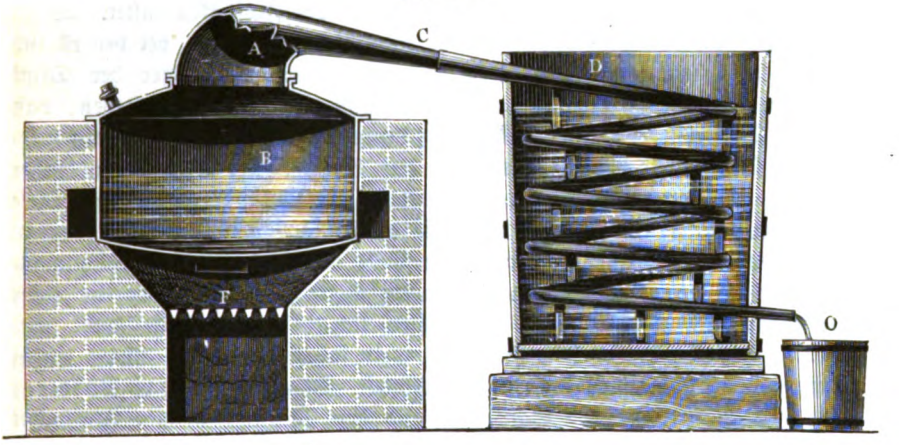
Dieser Prozeß, die sogenannte Destillation, ist ein Reinigungsprozeß. Wenn nämlich in der Flüssigkeit feste Stoffe aufgelöst sind, so bleiben diese in *b* zurück, da sie nicht verdampfen. Wenn man aus gewöhnlichem Quellwasser, welches verschiedene Salze gelöst enthält, reines Wasser darstellen will, so unterwirft man es der Destillation. Auf den Schiffen gewinnt man Trinkwasser durch Destillation von Meereswasser. In Fig. 271 ist ein moderner Destillierapparat einfacher Konstruktion abgebildet. In dem Kessel *B* wird die Flüssigkeit zum Sieden erhitzt, und die Dämpfe verdichten sich in einem Spiralrohre (sogenannten Kühlschlange), welches von kaltem Wasser umgeben ist.

Durch Destillation kann man Flüssigkeiten von verschiedenem Siedepunkt, die miteinander gemischt sind (z. B. Wasser und Spiritus) voneinander trennen. Man erwärmt das Gemisch, bis die Flüssigkeit, die den niedrigsten Siedepunkt hat, anfängt zu sieden. Diese destilliert dann über, während die weniger flüchtige Flüssigkeit zurückbleibt. Eine vollständige Trennung wird allerdings durch eine einmalige Destillation nicht erreicht, aber durch Wiederholung des

Digitized by Google

Verfahrens läßt sich ein höherer Grad der Trennung (Reinigung) erzielen. — Eine ausgedehnte Anwendung findet heute die sogenannte fraktionierte Destillation in der Industrie, z. B. in der Spiritusfabrikation, der Verarbeitung des Steinkohlenteers, sowie in der Petroleumraffinerie. Die dabei zur Anwendung kommenden Apparate sind allerdings in ihrer Einrichtung viel komplizierter als der in Fig. 271 abgebildete. Das rohe Petroleum ist ein Gemisch verschiedener mehr oder weniger flüchtiger Flüssigkeiten. Wenn es in

Fig. 271.



Destillierapparat.

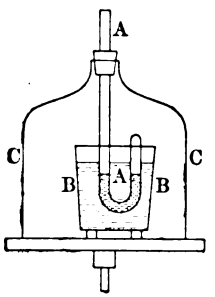
einem Destillierapparate erwärmt wird, so entweichen zunächst Gase, und dann destillieren verschiedene Flüssigkeiten über, bis 70° das sogenannte Gasöl (Naphta) und zwischen 70 und 120° Benzin. Diese Öle sind sehr leicht entzündlich und dürfen daher nicht in dem gereinigten Petroleum, welches als Brennöl dienen soll, enthalten sein. Dies geht zwischen 150 und 300° über. Wenn also die Temperatur im Destilliergefäße auf 150° gestiegen ist, so wird die Vorlage gewechselt und die von 150 bis 300° übergehende „Fraktion" von den vorhergehenden und den noch folgenden Fraktionen getrennt aufgefangen. Bei noch höheren Temperaturen geht erst dickflüssiges Maschinenöl und dann Vaselin über. Was schließlich im Destillierkessel zurückbleibt, ist eine asphaltartige Masse, die ähnlich wie der natürliche Asphalt verwendet werden kann. Nach demselben Verfahren gewinnt man aus dem Steinkohlenteer eine Anzahl von Verbindungen (Benzol, Toluol, Naphtalin, Phenol u. a.), die in den chemischen Fabriken weiter verarbeitet werden. Sie dienen zur Darstellung der bekannten Anilinfarben und zahlreicher anderer Präparate.

§ 327. Dieser alte Reinigungs- und Trennungsprozeß besteht in der Überführung einer Flüssigkeit in den gasförmigen (dampfförmigen) Zustand und die Zurückführung des Gases (Dampfes) in den flüssigen Zustand. Besonderes Interesse bietet in unseren Tagen der letztere Vorgang, da wir

Digitized by Google

Mittel besitzen, durch die wir alle Gase zu Flüssigkeiten verdichten können. — Im Destillierapparate verdichtet sich der Dampf, wenn er in die kalte Vorlage eintritt. Die Verdichtung kann also nur dann stattfinden, wenn die Vorlage (z. B. durch eine Kältemischung) unter den Siedepunkt der Flüssigkeit, deren Dampf verdichtet werden soll, abgekühlt wird. Wenn aber Luftarten, wie Kohlensäure, Wasserstoff, Sauerstoff u. dergl., zu einer Flüssigkeit verdichtet werden sollen, so muß gleichzeitig Abkühlung und Zusammendrückung angewandt werden. Der Siedepunkt einer Flüssigkeit liegt nun aber bekanntlich um so höher, je größer der Druck ist, der auf der Flüssigkeit lastet. Wenn man daher ein Gas zusammendrückt, so liegt die Temperatur, bei der es sich zu einer Flüssigkeit verdichten läßt, um so höher, je größer der Druck ist, unter dem es sich befindet. Dies ist jedoch nicht so zu verstehen, daß sich alle Luftarten bei jeder beliebigen Temperatur allein durch Druck verflüssigen lassen. Faraday unternahm auf Veranlassung Davys im Jahre 1823 eine Reihe von Untersuchungen über die Verflüssigung der Gase. Diese Untersuchungen wurden später von Thilorier in Paris und Natterer in Wien fortgesetzt. Der letztere drückte die Gase vermittelst einer Verdichtungspumpe in einem schmiedeeisernen Metallbehälter zusammen, der in einer Kältemischung stand. Manche Gase lassen sich in dieser Weise leicht verdichten. Das Kohlendioxyd z. B. verwandelt sich bei — 20° C unter einem Drucke von 20 Atmosphären in eine Flüssigkeit. Dagegen gelang es Natterer nicht, den Wasserstoff, den Sauerstoff und den Stickstoff in eine Flüssigkeit zu verwandeln, obgleich er sie einem Drucke von 2000 Atmosphären unterwarf. Thilorier fand, daß die flüssige Kohlensäure, wenn man sie aus einer feinen Öffnung aus dem Behälter ausströmen läßt, sehr schnell verdunstet und infolge der Abkühlung zu einer schneeartigen Masse erstarrt.

Fig. 272.



Faradays Apparat.

Faraday benutzte 1845 bei seinen Versuchen über die Verflüssigung der Gase ein Gemisch von Kohlensäureschnee und Äther. Die Kältemischung, eine Flüssigkeit von — 78° C, befand sich in dem Gefäße *B* (Fig. 272), welches unter der Glocke *C* stand. Die Gase, welche verdichtet werden sollten, befanden sich in dem Rohre *A*. Wenn die Luft aus der Glocke ausgepumpt wurde, so fand eine lebhafte Verdunstung der Kältemischung statt und die Temperatur derselben sank, wie ein eingetauchtes Weingeistthermometer anzeigte, auf — 110°. Aber trotzdem Faraday die Gase überdies noch stark zusammendrückte, gelang es ihm nicht, den Sauerstoff, den Stickstoff, den Wasserstoff und einige andere Gase zu einer Flüssigkeit zu verdichten. Er ahnte auch, weshalb sich diese Gase nicht verdichten ließen. „Es unterliegt keinem Zweifel", sagt er, „daß man mit Hilfe der Kälte Resultate erzielt, die sich nicht durch bloße Erhöhung des Druckes erreichen lassen." Er war der Ansicht, daß sich die genannten Gase nicht eher verdichten lassen würden, als bis man

Digitized by Google

Mittel gefunden haben würde, noch tiefere Temperaturen als — 110° C zu erzeugen.

Es hat sich tatsächlich herausgestellt, daß jedes Gas erst auf eine gewisse Temperatur abgekühlt werden muß, bevor es sich zu einer Flüssigkeit zusammendrücken läßt. Th. Andrews (1813 bis 1885), Professor der Chemie in Belfast, hat dies im Jahre 1869 durch Versuche nachgewiesen. Er drückte Kohlensäure in einem Glasrohre zusammen, welches durch ein Wasserbad auf einer bestimmten Temperatur erhalten wurde. Wenn die Temperatur der Kohlensäure höher als 31,1° C war, so wurde sie selbst durch einen Druck von 400 Atmosphären nicht verdichtet, sondern sie befolgte bis zu diesem Druck das Boylesche Gesetz (I, § 256). Sank dagegen die Temperatur der Kohlensäure unter 31,1° C, so erfolgte die Verdichtung bei einem Druck von 77 Atmosphären. Andrews nannte die Temperatur, oberhalb deren sich die Kohlensäure nicht durch Druck verflüssigen läßt (31,1°), die kritische Temperatur der Kohlensäure. Hat die Kohlensäure eine niedrigere Temperatur, so läßt sie sich durch Druck zu einer Flüssigkeit verdichten. Andrews schlug vor, eine Luftart Dampf zu nennen, wenn sie sich bloß durch Druck verflüssigen läßt, dagegen Gas, wenn sich die Verflüssigung nur durch Abkühlung und Druck bewirken läßt. Kohlensäure ist also bei Temperaturen unter 31,1° C ein Dampf, dagegen bei Temperaturen über 31,1° C ein Gas. Flüssige Kohlensäure kann daher nur bei Temperaturen unter 31,1° C existieren (vergl. I, § 259). Ebenso wie die Kohlensäure muß jedes andere Gas auf eine bestimmte Temperatur abgekühlt werden, um in den flüssigen Zustand übergeführt werden zu können. Jedes Gas hat seine kritische Temperatur. Sie ist, wie zuerst von Jamin ausgesprochen und von Cailletet und Mathias durch Versuche nachgewiesen worden ist, diejenige Temperatur, bei welcher der gesättigte Dampf der betreffenden Flüssigkeit ebenso dicht ist wie die Flüssigkeit selbst.

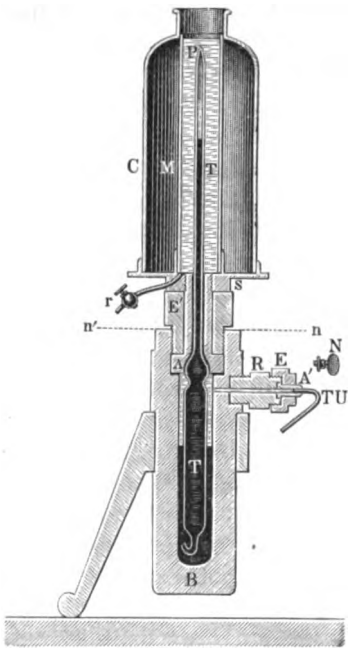
Andrews war sich, ebenso wie früher Faraday, klar darüber, daß sich die sogenannten permanenten Gase (Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Stickstoffoxyd, Sumpfgas und Kohlenoxyd) erst bei sehr niedriger Temperatur verdichten lassen würden. Die Verflüssigung der permanenten Gase gelang im Jahre 1877 fast gleichzeitig zwei verschiedenen Physikern, R. Pictet in Genf und L. Cailletet in Chatillon-sur-Seine. Pictet erzeugte die Kälte — ähnlich wie bei den Eismaschinen — durch Verdampfen von flüssiger Kohlensäure, die vorher selbst durch Verdunsten von flüssigem Schwefeldioxyd auf — 70° abgekühlt war. Auf diese Weise erzielte er eine Temperatur von — 140°, bei der sich der Sauerstoff unter einem Drucke von 50 Atmosphären zu einer farblosen Flüssigkeit verdichtete, die ungefähr dasselbe Gewicht wie das Wasser hat.

Die Einrichtung des von Cailletet benutzten Apparates ist aus Fig. 273 (a. f. S.) zu ersehen. *B* ist ein starker Stahlzylinder, der durch die Schraube *E* geschlossen wird. Durch diese Schraube geht wasserdicht ein starkes Glasrohr, welches oben zugeschmolzen ist und sich nach unten zu dem Behälter *T* erweitert. Dieses Glasgefäß wird mit dem Gase gefüllt, welches verdichtet

Digitized by Google

werden soll, und der Raum zwischen *B* und *T* wird mit Quecksilber gefüllt. Durch das Rohr *TU* wird dann vermittelst einer Druckpumpe Wasser eingepumpt. Infolgedessen dringt das Quecksilber in das Glasgefäß ein und das Gas wird zusammengedrückt. Das Rohr *T* ist mit einem Zylinder umgeben, den man mit flüssiger Kohlensäure oder mit flüssigem Schwefeldioxyd füllen kann, um das Rohr stark abzukühlen. Durch hinreichende Steigerung des Druckes lassen sich vermittelst dieses Apparates zahlreiche Gase verdichten.

Fig. 273.



Cailletets Apparat.

Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff werden, wie gesagt, erst bei sehr niedriger Temperatur flüssig. Die kritische Temperatur des Sauerstoffs z. B. ist —118° C. Die zur Verdichtung dieser Gase erforderliche Abkühlung erreichte Cailletet dadurch, daß er die Gase stark (bis auf 300 Atmosphären) zusammendrückte und dann den Druck plötzlich aufhob. Das Gas dehnt sich dann stark aus und kühlt sich infolgedessen ab. Wenn das Rohr *T* auf —105° C abgekühlt war, so sank bei Aufhebung des Druckes die Temperatur auf —200° C, und Cailletet konnte beobachten, daß sich die genannten Gase zu einer Flüssigkeit verdichteten.

Weitere Untersuchungen über die Verflüssigung der Gase sind von Wroblewski und Olszewski in Krakau und von Dewar in London ausgeführt worden. Der letztere hat zuerst größere Mengen von flüssigem Wasserstoff dargestellt und seine Eigenschaften genauer untersucht. Die kritische Temperatur des Wasserstoffs ist —242°. Die Dichtigkeit des flüssigen Wasserstoffs ist 0,08. Er siedet bei —252° C und erstarrt bei —257° zu einer eisartigen Masse. Ein zweckmäßiger Apparat zur Darstellung größerer Mengen flüssiger Luft wurde von Linde in München konstruiert.

§ 328. Durch die sogenannte trockene Destillation zerlegten die alten alexandrinischen Gelehrten organische Substanzen. Eine trockene Destillation findet statt, wenn man einen Körper unter Abschluß der Luft erhitzt. Wenn Pflanzenstoffe in einem geschlossenen Behälter erhitzt werden, so können sie nicht verbrennen, weil zur Verbrennung der Sauerstoff der Luft erforderlich ist. Aber die Stoffe werden durch die Hitze zerstört, und die flüchtigen Substanzen, welche dabei entstehen, können ebenso wie die Dämpfe bei der gewöhnlichen Destillation in einer Vorlage aufgesammelt werden.

Auf diese Weise gewinnt man heutzutage Leuchtgas aus Steinkohlen,

Digitized by Google

die außer Kohlenstoff auch Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff enthalten. Wenn die Steinkohlen in Retorten erhitzt werden, so entstehen zahlreiche gasförmige Zersetzungsprodukte, unter anderen Wasser, Ammoniak, eine Verbindung von Wasserstoff und Stickstoff, Kohlenoxyd, Kohlendioxyd und eine ganze Reihe von Kohlenwasserstoffen, d. h. Verbindungen des Kohlenstoffs mit Wasserstoff. Das Gas wird einem Reinigungsprozeß unterworfen und dann in großen, durch Wasser abgesperrten Behältern, sogenannten Gasometern, aufbewahrt (vergl. Taucherglocke, I, § 267).

Bei der trockenen Destillation wirkt im allgemeinen eine viel stärkere Hitze als bei der gewöhnlichen Destillation, und es finden daher auch viel tiefer gehende Veränderungen statt. Bei der gewöhnlichen Destillation werden Flüssigkeiten voneinander oder Flüssigkeiten von nicht flüchtigen Körpern getrennt. Bei der trockenen Destillation finden chemische Veränderungen statt. Es ist ein großer Unterschied, ob ein Stück Holz in der Luft brennt oder ob es durch trockene Destillation zerstört wird, aber in beiden Fällen entstehen neue Verbindungen oder, wie wir heute sagen, es finden chemische Prozesse statt.

§ 329. Außer dem Feuer kannten die Alten verschiedene andere Mittel, durch die in den Eigenschaften gewisser Körper eine eingreifende Veränderung bewirkt werden konnte. Sie kannten z. B. den Essig, in dem verschiedene mineralische Stoffe gelöst werden können. Plinius erzählt, Kleopatra habe kostbare Perlen in Essig gelöst und die Lösung getrunken, um eine Wette zu gewinnen, daß sie bei einer Mahlzeit für eine Million Sesterzien essen und trinken werde, und Plutarch berichtet, Hannibal habe bei seinem Übergang über die Alpen Klippen durch Übergießen mit Essig aus dem Wege geschafft. Ebenso war es den Ägyptern bekannt, daß man durch Übergießen von Asche mit Wasser eine Lösung von besonderen Eigenschaften erhält. Die Israeliten benutzten die Asche als Reinigungsmittel, da sich durch sie manche Unreinigkeiten entfernen lassen, auf die das Wasser keine Wirkung ausübt. Die griechischen Alexandriner haben ohne Zweifel nicht nur mit Hilfe des Feuers und der Destillation, sondern auch mit Hilfe verschiedener ätzender Flüssigkeiten allerhand künstliche Stoffe dargestellt.

Von Alexandria ging die chemische Kunst für eine Zeitlang zu den Arabern über, die in Spanien, nachdem sie hier zur Ruhe gekommen waren, eine großartige Tätigkeit entfalteten, um die naturwissenschaftliche Seite der griechischen Kultur weiterzubilden (vergl. I, § 59).

Der hervorragendste arabische „Chemiker" ist der Nachwelt unter dem Namen Geber bekannt. Sein eigentlicher Name war Dschabir ibn Hajjan und er lebte um das Jahr 900. Merkwürdigerweise weiß man nichts sicheres über seine persönlichen Verhältnisse, obgleich er das ganze Mittelalter hindurch als die höchste chemische Autorität galt. Auch weiß man nicht, ob er der Verfasser aller der Schriften ist, die namentlich im 16. Jahrhundert unter seinem Namen in lateinischen Übersetzungen veröffentlicht wurden. Aber wahrscheinlich sind doch einige der wichtigsten dieser Bücher von ihm verfaßt,

Digitized by Google

und diese legen Zeugnis dafür ab, daß er die Alexandriner bedeutend überragte. Er kannte mehr Arbeitsmethoden und mehr Hilfsmittel als diese, und er schrieb über seine Arbeiten klar und verständlich, während die Sprache der Alexandriner in hohem Grade symbolistisch und daher schwer zu verstehen war.

Gebers Anschauungen über die Beschaffenheit der Materie waren im wesentlichen die der griechisch-alexandrinischen Gelehrten. Er ist Anhänger der aristotelischen Elementartheorie, glaubt an die Möglichkeit der Goldbereitung u. s. w. Aber er spricht doch klar über die Zusammensetzung der Stoffe, und man bekommt durch seine Schriften Kenntnis von den Vorstellungen der Alten über die Natur der Materie.

Was die Metalle betrifft, so nahm Geber an, daß sie alle aus Quecksilber und Schwefel bestehen. Die einzelnen Metalle unterscheiden sich voneinander nur durch das Verhältnis, in dem die beiden Bestandteile in ihnen enthalten sind. Wenn daher ein Metall in ein anderes verwandelt werden soll, so muß das Verhältnis zwischen Quecksilber und Schwefel geändert werden. Das Quecksilber verleiht den Metallen Dehnbarkeit, Glanz und Schmelzbarkeit, der Schwefel gibt ihnen Farbe und macht sie veränderlich im Feuer, d. h. brennbar. Quecksilber und Schwefel nannte Geber die Prinzipien der Metalle. — Wenn also Geber die Metallverwandlung für möglich hielt, so stand dies mit seiner Auffassung der Natur der Materie vollkommen in Einklang. Einen Stoff aus einem Körper darstellen zu wollen, der diesen Stoff nicht enthält, ist eine Torheit. „Da aber alle Metalle aus Quecksilber und Schwefel bestehen, so kann man das, was fehlt, hinzufügen oder das, was im Überschuß vorhanden ist, entfernen." Dies wird durch Destillation, Auflösung u. s. w. erreicht, und die wirksamen Mittel sind Salz, Alaun, Vitriol, Borax, starker Essig und Feuer. Geber kannte die Salpetersäure und wahrscheinlich auch die Schwefelsäure.

Die Mittel zur Verwandlung der Metalle, die sogenannten „Medizinen", zerfallen in drei Gruppen. Medizinen der ersten Ordnung sind in der Natur vorkommende Stoffe. Sie verändern die unedlen Metalle, aber die Veränderung ist nicht dauerhaft. Medizinen der zweiten Ordnung, die durch Reinigung von Naturprodukten dargestellt werden, können unedle Metalle zum Teil in edle verwandeln. Die vollständige Verwandlung kann aber nur durch die Medizin der dritten Ordnung, den Stein der Weisen oder das große Elixier, bewirkt werden.

Die Darstellung des Steines der Weisen war es, auf die die ganze Tätigkeit der Goldmacher, der Alchemisten, gerichtet war. Die Anweisungen Gebers sind unklar und geben (selbstverständlich) keine wirkliche Anleitung.

Wenn auch für Geber und die späteren Alchemisten des Mittelalters die Metallverwandlung das Hauptproblem war, so wurden doch andere Probleme, welche durch die chemische Kunst gelöst werden konnten, keineswegs vernachlässigt. Die nächsten Nachfolger Gebers waren arabische Ärzte, unter ihnen der berühmte Avicenna (Ibn Sina). Er war 980 in der Nähe

Digitized by Google

von Bochara geboren, war Leibarzt mehrerer Sultane von Bochara, welches sich damals nach Westen über den größten Teil des heutigen Persiens erstreckte, lehrte Medizin und Philosophie in Ispahan und starb 1037 in Hamadan. Er hat ein Lehrbuch der Heilkunde verfaßt, welches bis in das 16. Jahrhundert in Gebrauch gewesen ist. In diesem Buche tritt er mit Entschiedenheit für die Lehren des Claudius Galenos (131 bis 201) ein. Dieser geht von den vier Elementen als den Bestandteilen aller Körper aus. Solange die Elemente im menschlichen Körper in einem passenden Verhältnis gemischt sind, ist der Körper gesund. Wenn dagegen eins der Elemente das Übergewicht erhält, so wird die Zusammensetzung des Blutes unnatürlich und der Körper wird krank. Um die Krankheit zu heilen, muß das richtige Verhältnis der vier Elemente wiederhergestellt werden. Die Entwickelung der chemischen Kunst hatte natürlich zur Folge, daß die Anzahl der Heilmittel größer wurde. Je mehr Stoffe die Chemiker darstellen konnten, desto größer war die Möglichkeit, für jede Krankheit ein geeignetes Heilmittel zu finden. Geber vermehrte bedeutend die Anzahl der Stoffe, die nach bestimmten Methoden dargestellt werden konnten, und eine Folge davon war, daß bei den Arabern Apotheken entstanden, in denen die Heilmittel nach bestimmten Regeln, und zwar hauptsächlich aus Pflanzenstoffen dargestellt wurden.

§ 330. Von den Arabern kam die chemische Kunst zu den süd- und westeuropäischen Völkern. Die arabischen Hochschulen führten zur Gründung von Hochschulen in Italien, Frankreich, England und Deutschland (vergl. I, § 59). Zu den Lehrgegenständen gehörten außer Mathematik, Physik und Philosophie auch Alchemie und Heilkunde. Vom 11. bis zum 16. Jahrhundert beschäftigten sich zahlreiche gelehrte und scharfsinnige Männer, größtenteils Mönche, mit Alchemie. Welche Rolle die Goldmacherkunst in manchen Klöstern gespielt hat, kann man daraus ersehen, daß der Papst 1317 den Mönchen verbot, sich mit Alchemie zu beschäftigen. — Zu denjenigen, die sich im Mittelalter mit der Goldmacherkunst beschäftigten, gehören einige der größten Gelehrten jener Zeit, unter anderen auch Albertus Magnus, Graf von Bollstädt (geb. 1193 zu Lauingen in Schwaben, gest. 1280 in Köln). Er studierte in Padua, wurde Dominikanermönch, lehrte in Köln, Straßburg und Paris, wurde Bischof von Regensburg, legte aber diese Würde nieder, um sich in Köln ausschließlich den Wissenschaften zu widmen. In Paris wurden seine Vorlesungen über Aristoteles von einer solchen Menge von Zuhörern besucht, daß sie im Freien gehalten werden mußten. Albertus Magnus ist einer der größten deutschen Theologen des Mittelalters. Er war ein gewissenhafter und zuverlässiger Forscher, einerlei ob er den Aristoteles studierte und auslegte, oder ob er die Natur beobachtete und studierte. Er hat in hohem Grade dazu beigetragen, daß die Alchemie für fromme und gelehrte Mönche eine geachtete Beschäftigung wurde. Er war von der Möglichkeit der Metallverwandlung fest überzeugt. Es war übrigens nicht jedermanns Sache, sich mit diesem Problem zu beschäftigen. Ein Alchemist muß nämlich nach Albertus Magnus die folgenden Eigenschaften haben. Er

Digitized by Google

muß verschwiegen sein, er muß abseits wohnen, ein besonderes Arbeitszimmer haben, er muß die richtige Zeit als Arbeitszeit wählen, Ausdauer haben und Vermögen besitzen, damit er sich die erforderlichen Hilfsmittel anschaffen kann. Er muß mit den chemischen Arbeitsmethoden vertraut sein, nur Gefäße aus Glas benutzen und sich von Fürsten fernhalten. — In diesen Auslassungen liegt der Keim der Geheimtuerei, in die sich die mittelalterliche Goldmacherei einhüllte. Albertus selbst war ein fleißiger Forscher. Er wollte ebenso wie Geber nicht den einen Stoff in den anderen „verwandeln", sondern den einen durch Veränderung der Zusammensetzung in den anderen überführen. Der „Stein der Weisen" sollte nach seiner Ansicht „natürlich" wirken. Sein großer Zeitgenosse Roger Bacon (I, § 80) hatte trotz all seines Scharfsinns und seiner Befähigung für direkte Naturbeobachtung phantastische Begriffe von der Kraft des Steins der Weisen. Er ist davon überzeugt, daß der Stein der Weisen das millionenfache seines eigenen Gewichtes unedles Metall in Gold verwandeln kann und daß er zugleich die Kraft besitzt, das menschliche Leben zu verlängern. Auch Thomas von Aquino (1224 bis 1274) glaubte fest an die Wirkung des großen Elixiers. So verwandelte sich die Lehre von der Möglichkeit der Metallverwandlung nach und nach in den Glauben an die Existenz eines Universalmittels. Die Alchemie wurde zu einer geheimen Kunst, die nur besonders begnadete Menschen ausüben konnten, und an allen Orten traten Adepten, d. h. Personen auf, die behaupteten, in die geheimnisvolle Kunst des Goldmachens eingeweiht zu sein.

Die Fürsten hatten, wie man sich leicht denken kann, großes Interesse an der Goldmacherei, und sie suchten die Adepten an sich zu ziehen. Albertus Magnus warnte mit Recht die Goldmacher, in den Dienst der Fürsten zu treten, denn in den meisten Fällen endete es mit Betrügerei oder mit harter Strafe, da die Adepten ihr Versprechen nicht einlösen konnten, das sie ohne Zweifel oft in gutem Glauben gaben, da sie hofften, daß ihnen die Metallverwandlung gelingen werde, wenn sie über die dazu erforderlichen Hilfsmittel verfügen würden. Die fortwährenden Enttäuschungen, welche die Goldmacher den Fürsten bereiteten, haben viel dazu beigetragen, die Alchemie in Mißkredit zu bringen.

§ 331. Aus der Geschichte der Alchemie kann man deutlich ersehen, in welchem Grade die Naturforschung von der leitenden Grundauffassung, von einer angenommenen Hypothese abhängig ist. Das ganze Mittelalter hindurch war die Alchemie die einzige experimentierende Wissenschaft, wenn man diese Bezeichnung auf sie anwenden darf. Alle nur denkbaren Versuche wurden angestellt und die wunderlichsten Mittel versucht, denn man wußte ja nicht, auf welchem Wege es gelingen würde, den Stein der Weisen zu finden. Aber der Lösung der Aufgabe kamen die Experimentatoren nicht näher. Das bloße Experimentieren genügt nicht. Der Wert der gewonnenen Erfahrungen hängt von der leitenden Hypothese ab. Nur durch Zuhilfenahme einer solchen erreicht man es, die Einheit in der Mannigfaltigkeit zu erkennen. Immerhin

Digitized by Google

ist das eifrige, aber planlose Experimentieren der Alchemisten nicht ganz wertlos gewesen.

Es wurden neue Arbeitsmethoden angewandt und die alten wurden weiter ausgebildet und verbessert. Männer wie Arnoldus Villanovanus, der während der zweiten Hälfte des 13. Jahrhunderts zuerst in seinem Vaterlande Spanien, später in Frankreich und in Italien als Lehrer und Arzt tätig war, und Basilius Valentinus, ein in der ersten Hälfte des 15. Jahrhunderts lebender Benediktinermönch, stellten zahlreiche neue chemische Präparate dar, von denen viele als Heilmittel benutzt wurden. Die chemischen Arbeitsmethoden wurden während der langen Periode der Goldmacherei vervollkommnet, aber es wurde wenig mit den verbesserten Methoden erreicht, weil man bei dem Experimentieren von einer falschen Auffassung der Natur der Materie ausging.

§ 332. Selbstverständlich übte die Renaissance ihre Wirkung auch auf dem Gebiete der Chemie aus. Diese Wirkung machte sich anderthalb Jahrhunderte lang geltend. Daß die Alchemie das ganze Mittelalter hindurch ihre Herrschaft behaupten konnte, hatte seinen Grund in dem Autoritätsglauben, der das geistige Leben dieser Zeit kennzeichnet. Die Renaissance bezeichnet einen Bruch mit der Autorität. Neue Ziele wurden gesteckt und die alten ganz oder teilweise beiseite geschoben. Zu denjenigen Männern, die die chemische Kunst in neue Bahnen lenkten, gehört in erster Linie Paracelsus (geb. 1493 in Maria Einsieden im Kanton Schwyz, gest. 1541 in Salzburg). Bis dahin war das Endziel die Metallverwandlung gewesen. Paracelsus wies mit Nachdruck darauf hin, daß die Aufgabe der chemischen Kunst die Darstellung von Heilmitteln sein müsse. Seine Losung war, daß die Heilkunde und die Chemie Hand in Hand gehen müssen. Die Heilwissenschaft war nichts ohne chemisch bereitete Medikamente, und die Aufgabe der Chemie war es, die Entwickelung der Heilwissenschaft nach Kräften zu fördern. Krankheiten im menschlichen Körper sind auf chemische Ursachen zurückzuführen und können nur durch chemische Heilmittel bekämpft werden. Paracelsus benutzte eine ganze Anzahl von Stoffen als Heilmittel, die man früher nur als Giftstoffe gekannt hatte. Er hatte Glück mit verschiedenen schwierigen Kuren und er brachte zugleich in die Heilkunde und in die Chemie neues Leben.

Große Bedeutung gewann diese neue Bewegung dadurch, daß sich jetzt die Ärzte, also wissenschaftlich gebildete Männer, mit chemischen Arbeiten befaßten, und nicht mehr ausschließlich die Goldmacher, die sich, wie gesagt, keines großen Ansehens mehr erfreuten. Paracelsus brachte die Chemie nicht durch eigene Arbeiten vorwärts. Sein Einfluß steckte auch nicht der Chemie ein wesentlich neues Ziel, denn ob es sich um Goldmachen oder um Darstellung von Heilmitteln handelt, ist ziemlich einerlei. Sein Verdienst besteht darin, daß er die Chemie mit der Heilwissenschaft in Verbindung brachte.

Paracelsus hieß mit seinem vollen Namen Philippus Aureolus Theophrastus Paracelsus Bombastus von Hohenheim. Diesem hoch-

Digitized by Google

tönenden Namen entsprechend war er ein hochmütiger und prahlerischer, dabei aber doch genialer Mann. Er führte ein unglückliches Leben. Nachdem er in Basel eine ziemlich mangelhafte Ausbildung als Arzt erhalten hatte, suchte er in die Geheimwissenschaft der Alchemisten einzudringen. Dann unternahm er große Reisen durch die verschiedenen Länder Europas, auf denen er seine Kenntnisse zu erweitern eifrig bemüht war. Nach Basel zurückgekehrt, kam er alsbald in den Ruf eines Wunderdoktors, und im Jahre 1526 wurde er als Professor der Medizin an der Universität angestellt. Hier trat er als Reformator auf, verwarf die alten medizinischen Autoritäten Galenus und Avicenna, deren Werke er öffentlich verbrannte, und hielt in deutscher Sprache Vorlesungen über seine chemisch-medizinischen Theorien. Bereits nach zwei Jahren verließ er infolge eines Streites mit dem Magistrat Basel und begann von neuem ein unstetes Wanderleben. Er hatte zwar gute Einnahmen, allein da er ein verschwenderisches Leben führte, starb er in dürftigen Verhältnissen.

§ 333. Die Lehren des Paracelsus fanden bei einem Teil der Ärzte großen Beifall, während sie von einem anderen Teile heftig bekämpft wurden. Ein Mann, der wesentlich dazu beigetragen hat, daß eine unparteiische Würdigung seiner Verdienste die Oberhand gewann, war Andreas Libau (Libavius). Er war erst als Arzt und dann als Schulmann tätig und starb als Rektor in Koburg im Jahre 1616. Auch er verwarf die Übertreibungen und die Geheimtuerei des Paracelsus, wies aber anderseits darauf hin, daß dieser eine ganze Reihe brauchbarer Medikamente in die Heilkunde eingeführt hatte. Er schrieb ein Lehrbuch der Chemie, in dem er in einfachen klaren Worten, die einen angenehmen Gegensatz gegen den schwülstigen Stil des Paracelsus bilden, chemische Arbeitsmethoden, Gerätschaften und Präparate beschreibt. Er war aber trotzdem weiter nichts als Alchemist, nicht ein Chemiker im modernen Sinne des Wortes. Er glaubte fest an die Möglichkeit des Goldmachens und hatte großes Vertrauen zu der von Villanovanus eingeführten Medizin, welche „trinkbares Gold" enthielt. In Libau ist sozusagen der Übergang von der Alchemie zu einer wirklich wissenschaftlichen chemischen Forschung verkörpert. Dasselbe gilt von seinem berühmten Zeitgenossen, dem holländischen Arzt Johann Baptist van Helmont (1577 bis 1644), der nicht nur auf dem Gebiete der Medizin, sondern auch auf dem der Chemie als selbständiger Forscher tätig war. Er war ein ausgezeichneter Beobachter, hatte aber als echtes Kind seiner Zeit einen starken Hang zum Mysticismus und Aberglauben. Dabei war er von einem großen Selbstvertrauen und von dem Drange beseelt, sich von den geltenden Autoritäten frei zu machen. Er hatte hinreichende Sprachkenntnisse, um die griechischen Philosophen ohne Zuhilfenahme der mittelalterlichen Kommentare studieren zu können. Als Arzt hielt er sich zuerst an Hippokrates und Galenus, kam aber zu der Einsicht, daß Paracelsus in vielen Punkten ein besserer Führer sei, und er wurde einer der hervorragendsten Vorkämpfer für dessen Theorien, soweit er sie als richtig anerkannte.

Digitized by Google

Auf rein chemischem Gebiete war er ein Gegner der aristotelischen Lehre. Namentlich bekämpfte er die Ansicht, daß das Feuer ein Element sei. Das Feuer ist nicht etwas stoffliches, es ist nur brennender Rauch; die Flamme ist glühender Rauch. Auch die drei Elemente der Alchemisten, Schwefel, Quecksilber und Salz (welches Basilius Valentinus zu den beiden Elementen Gebers hinzugefügt hatte), erkannte er nicht als Elemente an. Van Helmont bezeichnet dagegen das Wasser als einen der Grundbestandteile der Körper; alle Öle, Weingeist, Wachs, alle brennbaren Körper enthalten Wasser, wie sich zeigt, wenn der Körper entzündet wird. Die Pflanzen bilden nicht nur ihre brennbaren, sondern auch ihre erdartigen Bestandteile aus Wasser. Dies glaubte er durch den Versuch bewiesen zu haben. Er brachte in einen Kübel 200 Pfund trockene Erde und pflanzte in diese einen Weidenzweig, der 5 Pfund wog. Das Ganze wurde sorgfältig gegen Staub geschützt, und jeden Tag wurde die Erde mit Regenwasser begossen. Nach Ablauf von 5 Jahren war die Weide bis auf ein Gewicht von 164 Pfund gewachsen, dagegen hatte sich das Gewicht der Erde nur um wenige Unzen verändert. Hieraus schloß van Helmont, daß die Pflanze alle ihre Bestandteile ausschließlich aus Wasser gebildet habe. Folglich kann das Wasser in Erde verwandelt werden, denn die Pflanzenasche ist ja Erde. Also ist die Erde kein Element, wie Aristoteles gelehrt hatte. Van Helmont behauptete, auch die Verwandlung von Erde in Wasser sei möglich, doch hat er nicht angegeben, in welcher Weise diese Verwandlung ausgeführt werden kann.

Wichtiger als seine Beobachtungen über Feuer, Erde und Wasser waren seine Untersuchungen über die Luftarten. Seit den ältesten Zeiten war es bekannt, daß es außer der gewöhnlichen Luft auch brennbare Luft und erstickende Luft gibt, die an manchen Orten der Erde entströmt. Man glaubte jedoch, auch diese Luftarten seien gewöhnliche Luft, der etwas brennbares oder etwas erstickendes beigemengt sei. Man konnte Luftarten nicht künstlich darstellen, aber man kannte verschiedene „Luftmischungen" aus Bergwerksgruben. Wenn sich bei chemischen Prozessen eine Luftentwickelung bemerkbar machte, so legte man dieser Erscheinung keine große Bedeutung bei, indem man annahm, daß es sich in solchen Fällen immer nur um gewöhnliche Luft handle.

Van Helmont unterschied mehrere Luftarten und nannte diejenigen, welche von der gewöhnlichen Luft verschieden sind, Gase. Ein Gas unterscheidet sich nach Helmont von einem Dampf dadurch, daß der Dampf zu einer Flüssigkeit verdichtet werden kann, ein Gas dagegen nicht (vgl. § 327). Van Helmont verstand es, verschiedene Luftarten durch Einwirkung von Säuren auf Metalle oder kalkartige Körper, durch Verbrennung, Gärung und Verwesung darzustellen, aber eine genauere Untersuchung dieser Luftarten gelang ihm nicht, weil er sie nicht aufzusammeln verstand. Er sah infolgedessen eine Anzahl verschiedener Luftarten als identisch an, weil sie, wie die Kohlensäure, die Verbrennung und die Atmung nicht unterhielten. Ebenso hielt er verschiedene brennbare Gase für eine und dieselbe Luftart.

Digitized by Google

Ob Luft ebenso wie das Wasser ein Element ist, will van Helmont nicht bestimmt entscheiden, aber er erklärt, daß die Luft nicht in Wasser verwandelt werden kann, ebensowenig wie das Wasser in Luft verwandelt werden kann. Beide Körper sind vollständig unabhängig voneinander. Aristoteles hatte bekanntlich das gerade Gegenteil behauptet.

§ 334. Van Helmont machte die folgende wichtige Beobachtung. Wenn ein Licht in Luft brennt, die durch Wasser abgesperrt ist, so erlischt es alsbald und ein Teil der Luft wird bei der Verbrennung verbraucht, was man daran erkennt, daß das Wasser eindringt. Van Helmont untersuchte jedoch die Erscheinung nicht näher. Er begnügte sich mit der Erklärung, daß das, was die Verbrennung unterhält und was bei der Verbrennung verbraucht wird, nicht die Luft selbst ist, sondern ein Stoff, der in den Poren der Luft enthalten ist. Sylvius de la Boë (1614 bis 1672), Professor der Medizin in Leiden, bezeichnete diesen Stoff als etwas salpeterartiges, eine Annahme, der sich auch Robert Hooke (I, § 166) anschloß. Sein Nachfolger, John Mayow (1645 bis 1679), gab 1669 eine Erklärung der Verbrennung, die im wesentlichen mit der später von Lavoisier gegebenen Erklärung übereinstimmte, die aber wenig Beachtung fand und alsbald ganz in Vergessenheit geriet.

§ 335. Im Jahre 1661 erschien in Oxford ein Buch unter dem Titel „The sceptical Chymist" (Der skeptische Chemiker). Der ungenannte Verfasser des Buches bekämpfte nachdrücklich die Theorien des Aristoteles und der Alchemisten, und stellte die Behauptung auf, die Chemie sei eine reine Erfahrungswissenschaft.

Der Verfasser dieses Buches war der wiederholt genannte Robert Boyle (geb. 1627), ein Sohn Richard Boyles, des „großen Grafen von Cork", der als junger Mann nach Irland gekommen war und sich dort ein großes Vermögen erworben hatte. Während er die Schule zu Eton besuchte, wurde durch einen eigentümlichen Zufall sein Interesse auf die Naturwissenschaften gelenkt. Als er eines Tages in dem Laboratorium eines Apothekers den Versuchen, die dieser anstellte, beiwohnte, erfolgte eine Explosion. Dieses Ereignis machte einen tiefen Eindruck auf ihn und wurde für ihn die Veranlassung, sich dem Studium der Naturwissenschaften zuzuwenden. Im Alter von 12 Jahren trat er in Begleitung eines Bruders und eines Hofmeisters eine Reise nach Frankreich, der Schweiz und Italien an. Die sechs Jahre, welche diese Reise dauerte, waren eine fruchtbare Studienzeit. In Florenz studierte er im Winter 1641 bis 1642 die Werke und Apparate Galileis, und man darf wohl sagen, daß auch von dem Geiste Galileis etwas auf ihn überging. Als er später die erwähnte Schrift verfaßte, bediente er sich wie Galilei der Form des Dialogs, um die verschiedenen Ansichten zum Ausdruck zu bringen, und seine Sprache war wie die Sprache Galileis modern, d. h. klar und verständlich und frei von mystischen Ausdrücken und geheimnisvollen Andeutungen.

Boyle kehrte 1644 in die Heimat zurück, um sein Erbe — sein Vater

Digitized by Google

war inzwischen gestorben — anzutreten. Zu diesem Erbe gehörte unter anderen Besitzungen das Landgut Stalbridge in Dorsetshire. Hier ließ er sich nieder, um sich in Ruhe und Zurückgezogenheit mit dem Studium physikalischer und chemischer Werke, sowie mit Arbeiten in seinem Laboratorium zu beschäftigen. Im Jahre 1654 siedelte er nach Oxford über. Schon vorher war er Mitglied einer Gesellschaft, zu der auch der Mathematiker Wallis (I, § 178) gehörte und die sich die Aufgabe gestellt hatte, die experimentierende Wissenschaft zu fördern. Die Gesellschaft trat wenig an die Öffentlichkeit und wurde „das unsichtbare Kollegium" genannt. Ursprünglich hielt die Gesellschaft ihre Versammlungen in Greshams College, an dem der Vorsitzende, Samuel Forster, Professor der Astronomie war. Als aber ein Teil der Mitglieder nach Oxford übergesiedelt war, wurden nur von Zeit zu Zeit gemeinsame Sitzungen abgehalten.

Aus dieser Gesellschaft hat sich später die berühmte englische Gesellschaft der Wissenschaften entwickelt, die seit dem Jahre 1663 den Namen Royal Society führt. Anfangs stieß die Gesellschaft auf heftigen Widerstand von seiten der Kirche, und an Boyle, der als ein ernster und frommer Mann bekannt war, wurde in dringendster Weise das Ansinnen gestellt, aus der Gesellschaft auszutreten. Allein die Stimmung schlug, wenigstens teilweise, alsbald um, trotzdem die Erbitterung gegen die Schüler Francis Bacons groß war. Sowohl 1665, als die Pest in London herrschte, als auch 1666, als die Stadt von einer großen Feuersbrunst heimgesucht wurde, hat die Gesellschaft eine sehr dankenswerte Tätigkeit ausgeübt.

Ein Teil der Abhandlungen Boyles erschien in der Zeitschrift der Royal Society, den „Philosophical Transactions". Boyle verlegte 1668 seinen Wohnsitz nach London und war einer von den tätigsten Mitgliedern der Gesellschaft. Er beschäftigte sich nicht nur mit naturwissenschaftlichen, sondern auch mit historischen, sprachlichen und theologischen Studien. Auch für die Verbreitung der Bibel war er eifrig tätig und er übersetzte selbst das neue Testament in das Türkische. Er starb 1691.

„Der skeptische Chemiker" war nicht die erste wissenschaftliche Arbeit Boyles. Bereits im vorhergehenden Jahre, also 1660, gab er ein Werk über die Luft heraus, in welchem er seine Entdeckung des Zusammenhanges zwischen dem Volum und dem Druck der Luft veröffentlichte (I, § 257). In dem „skeptischen Chemiker" setzt Boyle seine Ansicht über die Natur der Elemente auseinander. Er stimmt mit Aristoteles darin überein, daß die Körper aus Elementen (Grundstoffen) bestehen und daß die Körper in diese Elemente zerlegt werden können, aber er kann nicht das Feuer, die Erde, das Wasser und die Luft als Elemente anerkennen. Boyle versteht unter einem Element einen nachweisbaren Bestandteil der Körper, der sich nicht in andere, von ihm verschiedene Bestandteile zerlegen läßt.

Boyle war sich darüber klar, daß es viele Substanzen gibt, die nach seiner Definition als Elemente angesehen werden müssen, und daß die Anzahl derselben mit der Vervollkommnung der chemischen Trennungsmethoden noch

Digitized by Google

größer werden würde. Boyles Elemente sind keine absoluten Grundstoffe, sondern nur der Ausdruck für chemische Erfahrungen. Im Laufe der Zeit können nicht nur neue Grundstoffe entdeckt werden, sondern es kann sich auch herausstellen, daß einige von den Körpern, die man als Elemente betrachtet, dies in Wirklichkeit nicht sind. Was also das Wesen der Elemente betrifft, so stimmen die Ansichten Boyles mit der heutigen Auffassung vollkommen überein. Boyle teilte auch seine Ansichten über die Wechselwirkung zwischen den durch den Versuch gefundenen Grundstoffen mit. Wenn sich zwei oder mehr als zwei vereinigen, so entsteht eine chemische Verbindung, die insofern ein selbständiger Stoff ist, als sie andere Eigenschaften hat als jeder der Bestandteile für sich. Die chemische Vereinigung erfolgt zwischen den kleinsten Teilchen der Grundstoffe infolge einer gegenseitigen Anziehung, die nur auf eine sehr geringe Entfernung hin wirksam ist. Die Grundstoffe selbst bestehen vielleicht aus ein und demselben Urstoff und unterscheiden sich nur durch die verschiedene Größe, Form und gegenseitige Lage der kleinsten Teilchen. — Boyle machte einen scharfen Unterschied zwischen einem Gemenge und einer chemischen Verbindung. In einem Gemenge liegen die Bestandteile, jeder mit seinen Eigenschaften, nebeneinander. Die chemische Verbindung ist ein vollkommen homogener (gleichartiger) Stoff, in welchem jeder einzelne Teil dieselben Eigenschaften hat.

Die Chemie wurde von Boyle zu einer exakten Wissenschaft erhoben, deren Aufgabe es ist, die Eigenschaften der Grundstoffe und der chemischen Verbindungen zu untersuchen und die Gesetze zu finden, nach denen die chemischen Veränderungen vor sich gehen.

§ 336. Wir können hier die Entwickelung der Chemie nicht Schritt für Schritt weiter verfolgen. Es mag nur hervorgehoben werden, daß es sich bei dieser Entwickelung bis zum Beginne des 19. Jahrhunderts vorzugsweise um die Natur des Verbrennungsprozesses handelte. Boyle, der ja viel mit der Luftpumpe arbeitete, machte die wichtige Beobachtung, daß sich selbst der Schwefel im luftleeren Raume nicht entzünden läßt. Ferner fand er, daß die beim Verbrennen eines Metalles entstehende Metallasche (Metallkalk) mehr wiegt als das verbrannte Metall. Ja er beobachtete, daß, wenn Blei in einem geschlossenen Raume verkalkt (d. h. langsam verbrannt) wird, etwas von der eingeschlossenen Luft verschwindet. Trotzdem brachte er die Gewichtszunahme nicht mit dem Luftverbrauch in Zusammenhang, sondern er nahm an, daß der Metallkalk deshalb schwerer ist als das Metall, weil das letztere beim Verbrennen wägbaren Wärmestoff aufnimmt.

Die Chemiker hatten, wie die Geschichte lehrt, einen langen Weg zurückzulegen, bevor es ihnen gelang, die Natur des Verbrennungsprozesses aufzuklären. Nach der Zeit Boyles nahm man seine Zuflucht zu anderen Erklärungen, die aber keineswegs der Tatsache gerecht wurden, daß das Metall beim Verbrennen an Gewicht zunimmt, d. h. daß das Verbrennungsprodukt schwerer ist als das Metall, durch dessen Verbrennung es entsteht. Der Arzt und Chemiker Johann Joachim Becher (geb. 1635 in Speyer, gest. 1682

Digitized by Google

in London) und nach ihm Georg Ernst Stahl (geb. 1660 in Ansbach, gest. 1734 in Berlin) stellten die eigentümliche Theorie auf, daß alle brennbaren Körper ein und denselben Stoff enthalten, der die Brennbarkeit bedingt. Stahl, der Professor der Medizin in Halle und später königlicher Leibarzt in Berlin war, entwickelte die neue Verbrennungstheorie 1702 in einem Anhang zu einer neuen Auflage derjenigen Schrift Bechers, in welcher dieser die Grundlagen der Theorie zum erstenmal ausgesprochen hatte. Stahl nannte den Bestandteil der Körper, der die Brennbarkeit bedingt, Phlogiston. Ein Körper, der feuerfest ist, enthält kein Phlogiston, ein Körper dagegen, der wie z. B. die Kohle verbrennt und nur wenig Asche hinterläßt, besteht zum größten Teil aus Phlogiston. Bei der Verbrennung entweicht nämlich das Phlogiston und die phlogistonfreien Bestandteile bleiben zurück.

Stahl selbst legte dem Umstande keine große Bedeutung bei, daß nach der Phlogistontheorie das Produkt der Verbrennung eines Metalles leichter sein müßte als das Metall selbst, während es in Wirklichkeit schwerer ist als dieses. Der französische Chemiker N. Lemery (1645 bis 1715) dagegen erkannte die Notwendigkeit, für diese Tatsache eine Erklärung zu finden. Er nahm daher an, daß ein Körper beim Verbrennen einerseits Phlogiston abgibt, aber anderseits wägbaren Wärmestoff aufnimmt. Stahl wußte selbstverständlich, daß die Verbrennung nur in Gegenwart von Luft stattfinden kann. Die Rolle, welche die Luft bei der Verbrennung spielt, bestand nach seiner Ansicht darin, daß sie das entweichende Phlogiston aufnimmt, und eine gewisse Menge Luft konnte nach seiner Meinung nur eine bestimmte Menge Phlogiston aufnehmen.

Das Phlogiston kann, so lehrte er weiter, unter gewissen Bedingungen aus einem Körper in einen anderen übergeführt werden. Die Metallasche (verbranntes Metall; Metall, welches sein Phlogiston abgegeben hat) wird zu Metall, wenn sie zusammen mit Kohle erhitzt wird. Wenn nämlich die Kohle erhitzt wird, so wird Phlogiston frei, welches von der Metallasche aufgenommen wird. Also: Metall — Phlogiston = Metallkalk, und umgekehrt: Metallkalk + Phlogiston = Metall.

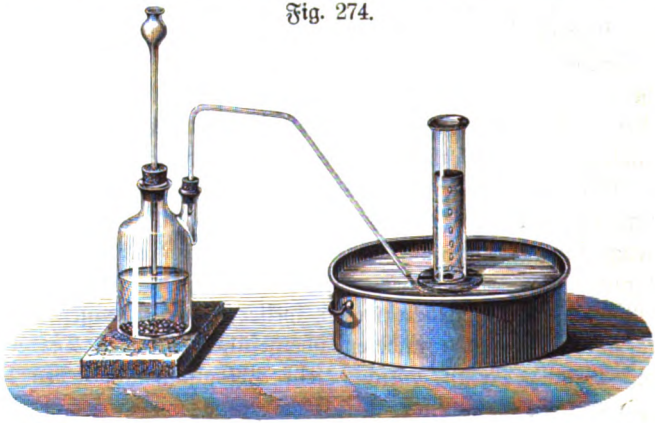
§ 337. Stahl glaubte, das Phlogiston sei ein Grundstoff, der sich nicht isolieren lasse. Wenn z. B. ein Stück Kohle verbrennt, so wird allerdings Phlogiston frei, aber es verteilt sich in der Luft so fein, daß man es nicht wahrnehmen kann. Die Luft ist nicht brennbar, auch dann nicht, wenn sie Phlogiston enthält. Dies hatte nach der Meinung der Phlogistiker seinen Grund darin, daß das Phlogiston und die Luft nicht miteinander verbunden waren. Das Phlogiston war „frei" in der Luft enthalten und wurde aus dieser von den Pflanzen aufgenommen. Da jedoch reine Kohle, z. B. Kienruß, vollständig verbrennt, so muß sie annähernd dasselbe wie Phlogiston sein. — Es gab aber noch andere Stoffe, die allem Anschein nach aus reinem Phlogiston bestanden. Zu diesen Stoffen gehört der Wasserstoff, den Henry Cavendish (I, § 306) durch Lösen von Zink in verdünnter Schwefelsäure darstellte. Cavendish fand, daß man aus einer bestimmten Menge Säure

Digitized by Google

immer dieſelbe Menge Waſſerſtoff erhält, auch wenn man ein anderes Metall als Zink in der verdünnten Säure löſt. Da nun eine beſtimmte Säuremenge, ſo ſchloß Cavendiſh, eine gewiſſe Phlogiſtonmenge austreibt und da, wie der Verſuch lehrt, eine beſtimmte Säuremenge ſtets dieſelbe Menge Waſſerſtoff entwickelt, einerlei welches Metall benutzt wird, und da der Waſſerſtoff ſehr brennbar iſt, ja vollſtändig verbrennen kann, ſo iſt Waſſerſtoff wahrſcheinlich nichts anderes als Phlogiſton.

Zur Ausführung der Verſuche von Cavendiſh ſind Apparate erforderlich, die es ermöglichen, den entwickelten Waſſerſtoff aufzuſammeln und zu meſſen. Schon Boyle hatte einen Gasentwickelungsapparat konſtruiert, der im weſentlichen die heute gebräuchliche Form bekam, als ihm der engliſche Geiſtliche und Chemiker Stephan Hales (1679 bis 1761), der ſich um die genauere Unterſuchung der Luftarten ſehr verdient gemacht hat, die durch Fig. 274 veranſchaulichte Einrichtung gab. Die Flaſche enthält Waſſer und

Fig. 274.



Waſſerſtoffentwickelungsapparat.

Zinkſtücke. Das gebogene Rohr iſt vermittelſt eines Stopfens in den einen Hals der Flaſche eingeſetzt und taucht mit dem anderen Ende in ein Gefäß mit Waſſer (ſogenannte pneumatiſche Wanne) ein, und zwar ſo, daß es unter der Mündung eines umgeſtürzten und mit Waſſer gefüllten Zylinders endet. Wenn durch das Trichterrohr Schwefelſäure in die Flaſche gegoſſen wird, ſo entwickelt ſich Waſſerſtoff, der durch das gebogene Rohr entweicht und ſich im Zylinder anſammelt. Will man reinen Waſſerſtoff haben, ſo darf der Zylinder erſt dann über das Ende des Rohres geſchoben werden, wenn die Luft aus der Flaſche vollſtändig ausgetrieben iſt.

Cavendiſh ermittelte das ſpezifiſche Gewicht des Waſſerſtoffs und fand, daß es $14^1/_2$ mal ſo leicht als Luft iſt. Der Waſſerſtoff iſt das leichteſte aller Gaſe.

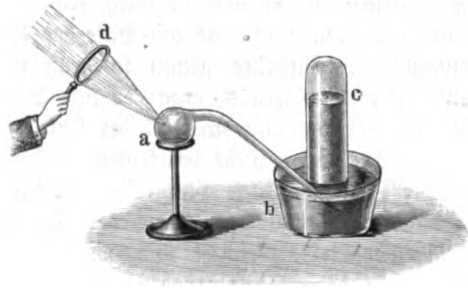
§ 338. Im Jahre 1774 entdeckte Joſeph Prieſtley (1733 bis 1804), ein Landsmann Cavendiſhs, der wie Hales Geiſtlicher und Chemiker war,

Digitized by Google

eine neue Luftart, die in bezug auf die Verbrennung ſozuſagen das Gegenteil vom Waſſerſtoff bildet, d. h. er brennt nicht, aber er unterhält ſehr lebhaft die Verbrennung anderer Körper. Den Ausgangspunkt für dieſe Entdeckung bildete ein Verſuch von Hales, ſowie ein Verſuch des franzöſiſchen Chemikers Pierre Bayen (1725 bis 1797). Hales hatte beobachtet, daß Bleikalk (Mennige) beim Erhitzen Luft abgibt, und Bayen hatte gefunden, daß roter Queckſilberkalk beim Erhitzen auch in Abweſenheit phlogiſtonhaltiger Stoffe in metalliſches Queckſilber übergeht, wobei der Kalk Luft abgibt.

Dieſe wichtigen Beobachtungen waren nicht genauer unterſucht worden, obgleich die Phlogiſtontheorie keine Erklärung für dieſelben gab. Erſt Prieſtley nahm Bayens Verſuch wieder auf und führte ihn in der durch Fig. 275 veranſchaulichten Weiſe aus. Der Kolben *a* enthält roten Queckſilberkalk, und der Hals des Kolbens iſt mit metalliſchem Queckſilber gefüllt, ebenſo die Schale *b* und der Zylinder *c*. Prieſtley ließ die durch ein Brennglas geſammelten Sonnenſtrahlen auf den Queckſilberkalk fallen. Dieſer wurde ſtark erhitzt und es entwickelte ſich, wie bereits Bayen beobachtet hatte, Luft, die ſich in dem Zylinder *c* über dem Queckſilber anſammelte, und zugleich erſchienen unter dem Queckſilberkalkpulver kleine Tröpfchen von metalliſchem Queckſilber.

Fig. 275.



Prieſtleys Darſtellung von Sauerſtoff.

Prieſtley unterſuchte die aus dem Queckſilberkalk entweichende Luft und fand, daß ſie die Verbrennung in viel höherem Grade unterhält als die gewöhnliche Luft. Ein Licht brannte in der neuen Luft viel lebhafter als in gewöhnlicher Luft, und wenn er einen glimmenden Holzſpan in dieſe Luft eintauchte, ſo brannte er mit ſtark leuchtender Flamme. Prieſtley hielt die neue Luftart für phlogiſtonfreie Luft, denn die lebhafte Verbrennung bewies, daß dieſe Luft weit begieriger Phlogiſton aufnimmt als die gewöhnliche Luft. Je ſchneller der brennende Körper ſein Phlogiſton abgeben konnte und je ſchneller die Luft dasſelbe aufnehmen konnte, deſto lebhafter war die Verbrennung. — Die von Prieſtley entdeckte Luft bekam ſpäter den Namen Sauerſtoff.

§ 339. Während in England Prieſtley mit der Unterſuchung verſchiedener Luftarten beſchäftigt war, waren in Schweden Karl Wilhelm Scheele (1742 bis 1786) und in Frankreich Antoine Laurent Lavoiſier (1743 bis 1794) mit ähnlichen Arbeiten beſchäftigt. Scheele, der Apotheker in Köping war, entdeckte ſelbſtändig, ohne von der Entdeckung Prieſtleys etwas gehört zu haben, den Sauerſtoff, den er „Feuerluft“ nannte. Trotzdem er mit dürftigen Hilfsmitteln arbeitete und nur ein Alter von 44 Jahren

Digitized by Google

erreicht hat, führte er eine große Anzahl selbständiger chemischer Arbeiten aus, die für die Wissenschaft bahnbrechend geworden sind. Allein er war von den Anschauungen der Phlogistontheorie befangen und daher entsprechen die Schlüsse, die er aus seinen Versuchen zog, keineswegs dem wahren Werte dieser Versuche. Es war Lavoisier vorbehalten, den Verbrennungsprozeß aufzuklären. Er erreichte dies dadurch, daß er die Wage in den Dienst der Chemie stellte und damit in erhöhtem Grade die Aufmerksamkeit auf die quantitative Seite des Verbrennungsvorganges lenkte.

Lavoisier zog aus der Tatsache, daß beim Verkalken (Verbrennen) eines Metalles eine Gewichtszunahme stattfindet, den Schluß, daß das Metall Stoff aufnimmt und nicht, wie die Phlogistiker angenommen hatten, Stoff abgibt. Er wies ferner durch den Versuch nach, daß, wenn ein Metall in einem geschlossenen Gefäße verkalkt wird, etwas von der in dem Gefäße enthaltenen Luft verbraucht wird, und mit Hilfe der Wage stellte er fest, daß die Gewichtszunahme des Metalles genau so groß ist wie der Gewichtsverlust, den die Luft erleidet. Hieraus konnte er mit Sicherheit den Schluß ziehen, daß sich bei der Verbrennung ein Teil der Luft mit dem Metall vereinigt.

Lavoisier verfuhr bei seinen Versuchen ähnlich wie früher Boyle. Er brachte Zinn in einen Glaskolben, verschloß diesen luftdicht und erhitzte ihn, so daß das Metall verkalkt wurde. Der Kolben nebst Inhalt hatte nach dem Erhitzen dasselbe Gewicht wie vorher. Wenn aber jetzt der Kolben geöffnet wurde, so drang Luft in denselben ein, und es zeigte sich, daß das Metall infolge der Verkalkung genau um das Gewicht der eindringenden Luft schwerer geworden war. Es konnte also keinem Zweifel unterliegen, daß die Verkalkung des Zinns darin bestand, daß sich das Zinn mit Luft vereinigte. Aber durch diesen Versuch war nicht entschieden, ob sich die Luft als solche, oder nur ein Bestandteil derselben mit dem Metall vereinigt. Auch gelang es Lavoisier nicht, die Luft aus dem Metallkalk wieder auszutreiben, so daß er sie genauer hätte untersuchen können.

Hier kam ihm Priestley mit seiner Entdeckung des Sauerstoffs zu Hilfe. Priestley hatte gezeigt, daß sich der Quecksilberkalk durch Erhitzen in Metall und Luft zerlegen läßt. Lavoisier schlug sozusagen den entgegengesetzten Weg ein. Er brachte etwas Quecksilber in eine Retorte (Fig. 276), die durch den Hals mit der Luft in Verbindung stand, die in einer Glasglocke über Quecksilber abgesperrt war. Das in der Retorte enthaltene Quecksilber wurde nun zwei Wochen lang im Sieden erhalten. Nach einigen Tagen zeigten sich rote Tröpfchen im Quecksilber, ein Zeichen, daß die Verkalkung des Metalls begann. Nach zwölf Tagen war ungefähr ein Fünftel der Luft verschwunden und bei weiterem Sieden fand keine weitere Bildung von Quecksilberkalk statt. Dies war der erste Teil von Lavoisiers Versuch. Der zweite Teil war nichts anderes als der Priestleysche Versuch. Er erhitzte den entstandenen Quecksilberkalk und erhielt wie Priestley Quecksilber und Sauerstoff, und zwar entsprach die Menge des letzteren genau der während der Verkalkung verschwundenen Luftmenge.

Digitized by Google

Lavoisier zog aus diesem Versuch die folgenden Schlüsse:

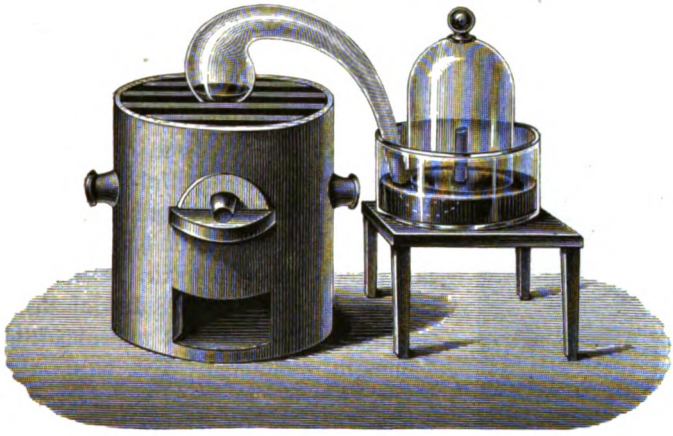
1. Wenn ein Metall an der Luft verkalkt (verbrannt) wird, so nimmt es einen Teil der Luft auf.

2. Der von dem Metall aufgenommene Teil der Luft ist Sauerstoff.

3. Ungefähr ein Fünftel der gewöhnlichen Luft ist Sauerstoff.

Das letztere ergab sich aus dem Umstande, daß, wenn ein Fünftel der abgesperrten Luft verschwunden war, die übrigen vier Fünftel keine weitere

Fig. 276.



Lavoisiers Versuch.

Verkalkung (Verbrennung) bewirkten. Die Luft besteht also aus Sauerstoff und mindestens einer anderen Luftart. Später hat man gefunden, daß sie außer dem Sauerstoff noch mehrere andere Gasarten enthält.

§ 340. Das wichtigste Ergebnis der Untersuchungen Lavoisiers ist jedoch keineswegs die Entdeckung, daß die Luft nicht ein einfacher Körper ist. Dies hatten auch Priestley und Scheele erkannt. Die Hauptbedeutung der Arbeiten Lavoisiers liegt vielmehr darin, daß durch sie der Phlogistontheorie der Todesstoß versetzt wurde. Jetzt war es überflüssig, zu dem hypothetischen Phlogiston seine Zuflucht zu nehmen, um den Verbrennungsprozeß zu erklären. Lavoisier zeigte nämlich, daß auch die Verbrennung des Schwefels, der Kohle und anderer Substanzen darin besteht, daß sich diese Körper mit dem Sauerstoff der Luft verbinden, ebenso daß die Verkalkung (Verbrennung) der Metalle darin besteht, daß sich die Metalle mit dem Sauerstoff vereinigen.

Die Verbrennung in der atmosphärischen Luft ist also eine Oxydation, d. h. eine Vereinigung des brennenden Körpers mit Sauerstoff. Hiermit hatte Lavoisier für die Auffassung der chemischen Prozesse und die Zusammensetzung der chemischen Verbindungen eine neue Grundlage geschaffen.

Digitized by Google

Seit dieser Zeit wurde die Wage das unentbehrliche Hilfsmittel der Chemiker, und seit der Aufklärung des Verbrennungsprozesses ist der Erfahrungssatz von der Unveränderlichkeit der Stoffmenge der rote Faden in der Entwickelung der Chemie gewesen. Die Materie kann weder geschaffen noch vernichtet werden, aber die Stoffe können zerlegt und vereinigt werden, und die Wage ist ein ausgezeichnetes Mittel, durch welches man sich in den chemischen Veränderungen zurechtfinden kann.

Lavoisier war der Sohn eines reichen Advokaten, hatte einen ausgezeichneten Schulunterricht genossen und während seiner Studienzeit die tüchtigsten französischen Naturforscher zu Lehrern gehabt. Er studierte auf Wunsch seines Vaters Rechtswissenschaft, wandte sich aber später ganz dem Studium der Naturwissenschaften zu. Seine erste Abhandlung über den Gips wurde 1765 in der Akademie gelesen, und drei Jahre später wurde er Mitglied der Akademie. Man erkannte bald sein Talent, und die Akademie kam oft in die Lage, sein Gutachten einzuholen.

Fig. 277.

Lavoisier.

Der junge Gelehrte hatte großes Interesse für Technik und Industrie. Seit 1776 war er Direktor der königlichen Pulverfabriken. Er ließ umfassende technische und wissenschaftliche Untersuchungen ausführen. Die dazu erforderlichen Mittel bestritt er aus den bedeutenden Einnahmen, die er als Generalpächter hatte. Während der Schreckensherrschaft wurde dieser ausgezeichnete Bürger und hervorragende Gelehrte trotz seiner Verdienste um das Vaterland und die Wissenschaft angeklagt und zum Tode verurteilt, weil er seine Stellung als Leiter der Staatsindustrie und als Generalpächter mißbraucht haben sollte. Er wurde 1794 nebst 27 anderen Generalpächtern hingerichtet. Robespierre verschonte niemanden, der eine hervorragende Stellung einnahm, und die Richter erklärten, die Republik brauche keine Gelehrten.

§ 341. Durch den Gebrauch der Wage wurde das Material geliefert, auf das Dalton (§ 80) seine Atomtheorie begründen konnte, die bis auf den heutigen Tag die Grundlage der chemischen Forschung geblieben ist. — Bevor wir uns eingehender mit dieser Atomtheorie beschäftigen, soll hier eine Liste der Grundstoffe gegeben werden, welche gegenwärtig bekannt sind.

Digitized by Google

Die Grundstoffe.

Name des Grundstoffes	Zeichen	Atomgewicht	Name des Grundstoffes	Zeichen	Atomgewicht
Aluminium	Al	26,9	Niob	Nb	93,3
Antim (Stibium)	Sb	119,5	Osmium	Os	189,9
Argon	Ar	39,7	Palladium	Pd	105,6
Arsen	As	74,5	Phosphor	P	30,8
Baryum	Ba	136,4	Platin	Pt	193,4
Beryllium	Be	9,0	Praseodym	Pr	142,4
Blei (Plumbum)	Pb	205,4	Quecksilber (Hydrargyrum)	Hg	198,5
Bor	B	10,9	Radium	Ra	225,0
Brom	Br	79,3	Rhodium	Rh	102,2
Cäsium	Cs	131,9	Rubidium	Rb	84,8
Calcium	Ca	39,8	Ruthenium	Ru	100,9
Cer	Ce	139,1	Samarium	Sa	148,9
Chlor	Cl	35,2	Sauerstoff (Oxygenium)	O	15,9
Chrom	Cr	51,7	Scandium	Sc	43,7
Eisen (Ferrum)	Fe	55,6	Schwefel (Sulphur)	S	31,8
Erbium	Er	165,0	Selen	Se	78,4
Fluor	F	18,9	Silber (Argentum)	Ag	107,1
Gadolinium	Gd	154,9	Silicium	Si	28,2
Gallium	Ga	68,5	Stickstoff (Nitrogenium)	N	13,9
Germanium	Ge	71,7	Strontium	Sr	86,9
Gold (Aurum)	Au	195,7	Tantal	Ta	181,2
Helium	He	4,0	Tellur	Te	127,1
Indium	In	112,8	Terbium	Tb	158,8
Iridium	Ir	191,7	Thallium	Tl	202,6
Jod	J	125,9	Thorium	Th	230,9
Kadmium	Cd	111,1	Thulium	Tu	169,4
Kalium	K	38,8	Titan	Ti	47,8
Kobalt	Co	59,1	Uran	U	237,8
Kohlenstoff (Carbonicum)	C	11,9	Vanadin	V	51,0
Krypton	Kr	81,2	Wasserstoff (Hydrogenium)	H	1,0
Kupfer (Cuprum)	Cu	63,1	Wismut (Bismutum)	Bi	206,5
Lanthan	La	137,6	Wolfram	W	182,7
Lithium	Li	7,0	Xenon	X	128,0
Magnesium	Mg	24,2	Ytterbium	Yb	171,7
Mangan	Mn	54,6	Yttrium	Y	88,3
Molybdän	Mo	95,3	Zink	Zn	64,9
Natrium	Na	22,9	Zinn (Stannum)	Sn	118,1
Neodym	Nd	139,4	Zirkonium	Zr	89,9
Neon	Ne	20,0			
Nickel	Ni	58,4			

Digitized by Google

Das chemische Zeichen eines Grundstoffes ist, wie man aus der Liste ersieht, der Anfangsbuchstabe des (lateinischen) Namens, dem noch ein zweiter Buchstabe hinzugefügt ist, wenn mehrere Namen denselben Anfangsbuchstaben haben. Das Zeichen bedeutet aber nicht nur den Namen des betreffenden Grundstoffes, sondern ein bestimmtes Gewicht, das Atomgewicht des betreffenden Elementes.

Die ersten Atomgewichtsbestimmungen wurden von Dalton ausgeführt. Die Ergebnisse seiner Untersuchungen wurden 1805 veröffentlicht.

Dalton hatte einige Jahre früher zwei verschiedene Verbindungen des Kohlenstoffs mit dem Wasserstoff untersucht und gefunden, daß mit ein und derselben Menge Kohlenstoff in der einen Verbindung doppelt so viel Wasserstoff verbunden ist als in der anderen. Dieselbe Gesetzmäßigkeit erkannte er in der Zusammensetzung der beiden Verbindungen des Kohlenstoffs mit dem Sauerstoff, dem Kohlenoxyd und dem Kohlendioxyd (Kohlensäure). Dieselbe Menge Kohlenstoff ist in der zweiten dieser Verbindungen mit doppelt so viel Sauerstoff verbunden als in der ersten. Noch auffallender tritt diese Gesetzmäßigkeit in den Verbindungen des Sauerstoffs mit dem Stickstoff hervor. Ein und dieselbe Menge, nämlich 28 Gewichtsteile Stickstoff, vereinigen sich mit 16, 32, 48, 64 oder 80 Gewichtsteilen Sauerstoff, also mit Gewichtsmengen, die sich wie 1 : 2 : 3 : 4 : 5 verhalten. Wenn sich ein und dieselbe Menge eines Elementes mit verschiedenen Mengen eines anderen Elementes verbindet, so läßt sich das Verhältnis der letzteren durch ganze Zahlen ausdrücken.

Diese eigentümliche Gesetzmäßigkeit in der Zusammensetzung der chemischen Verbindungen erklärte Dalton mit Hilfe der bereits im Altertum aufgestellten Hypothese, daß die Stoffe aus äußerst kleinen, unteilbaren Teilchen, den Atomen, bestehen (vgl. § 323). Jeder Grundstoff, sagte er, besteht aus gleichartigen Atomen mit unveränderlichem Gewicht, und die chemischen Verbindungen entstehen dadurch, daß sich die Atome der Grundstoffe vereinigen. Wenn ein Grundstoff mit einem anderen mehr als eine Verbindung bildet, so vereinigt sich eine gewisse Menge des einen (ein Atom oder mehrere Atome) entweder mit einem oder mit zwei oder mit drei u. s. w. Atomen des anderen. Also müssen sich notwendigerweise die Mengen des letzteren, welche mit ein und derselben Menge des ersteren verbunden sind, durch ganze Zahlen ausdrücken lassen.

§ 342. Eine notwendige Voraussetzung für Daltons Atomtheorie bilden die Arbeiten Lavoisiers. Ohne Hilfe der Wage würde Dalton nicht zu seiner Auffassung der Natur der chemischen Verbindungen gekommen sein. Es verdient hervorgehoben zu werden, daß er sich durch die damals herrschenden Ansichten über das Wesen der Wärme — sie wurde als etwas stoffliches betrachtet — nicht irre machen ließ. Mit Hilfe der Wage ließ sich die Existenz eines Wärmestoffes nicht nachweisen.

Was bedeutet nun der Ausdruck Atomgewicht? Selbstverständlich kann damit nicht das Gewicht eines einzelnen Atoms gemeint sein. Dies läßt sich

Digitized by Google

mit der Wage nicht ermitteln, da es sich nicht isolieren läßt und überdies unermeßlich viel kleiner ist, als das kleinste Gewicht, welches durch die Wage angezeigt wird. Wir wissen nichts bestimmtes über das wirkliche Gewicht der Atome, aber jedenfalls ist es außerordentlich klein. Das Atomgewicht ist nur ein relativer Begriff, d. h. die Zahlen für die Atomgewichte geben nur das Verhältnis der Atomgewichte der verschiedenen Grundstoffe an. In welcher Weise man sie ermittelt hat, läßt sich kurz in folgender Weise erläutern.

Die kleinsten Teilchen einer chemischen Verbindung können natürlich keine Atome sein, sondern sie müssen aus verschiedenen Atomen zusammengesetzt sein. Kreide (Kalkstein) besteht aus Calcium, Kohlenstoff und Sauerstoff. Selbst das kleinste Kreideteilchen enthält diese drei Grundstoffe. Das kleinste Teilchen Kreide, welches man sich denken kann, d. h. ein Teilchen, welches bei weiterer Teilung nicht in noch kleinere Teilchen Kreide, sondern in Calcium, Kohlenstoff und Sauerstoff zerfallen würde, nennt man ein Molekül.

Gewisse chemische Tatsachen haben nun ferner zu der Annahme geführt, daß nicht nur in den zusammengesetzten Körpern, sondern auch in den Grundstoffen die Atome zu Atomgruppen, d. h. zu Molekülen vereinigt sind. Der Unterschied zwischen den Molekülen eines zusammengesetzten Stoffes und eines Grundstoffes liegt also darin, daß die ersteren aus ungleichartigen, die letzteren dagegen aus gleichartigen Atomen bestehen.

Namentlich bei den gasförmigen Körpern deuten verschiedene Verhältnisse deutlich darauf hin, daß sie aus Molekülen bestehen, einerlei ob das Gas ein Grundstoff oder eine chemische Verbindung ist.

Nun hat, wie in der Wärmelehre erwähnt wurde, Gay-Lussac nachgewiesen, daß sich alle gasförmigen Körper beim Erwärmen gleich stark ausdehnen, und ferner hat Boyle gezeigt (I, § 257), daß sich das Volum aller Gase im umgekehrten Verhältnis des Druckes ändert. Hieraus zog der italienische Physiker Amedeo Avogadro (1776 bis 1856) den Schluß, daß gleiche Raumteile verschiedener Gase bei gleicher Temperatur und gleichem Druck gleichviel Moleküle enthalten. Dieses Avogadrosche „Gesetz" läßt sich auch in der Weise aussprechen, daß man sagt, die Moleküle verschiedener Gase nehmen bei gleicher Temperatur und gleichem Druck denselben Raum ein. Da die Gesetze von Gay-Lussac und von Boyle für zusammengesetzte Gase ebenso wie für einfache Gase gelten, so ist es sehr wahrscheinlich, daß die letzteren ebenso wie die ersteren aus Molekülen, d. h. aus Atomgruppen und nicht aus einzelnen Atomen bestehen.

Um also das Verhältnis der Molekulargewichte gasförmiger Körper zu bestimmen, hat man nur nötig, die Gewichte gleicher Raumteile bei gleicher Temperatur und gleichem Druck zu ermitteln. Das Verhältnis der Volumgewichte ist dann zugleich das Verhältnis der Molekulargewichte. Als Einheit für die Volumgewichte, also auch für die Molekulargewichte, dient das Gewicht des leichtesten aller Gase, des Wasserstoffs.

Aus dem Molekulargewicht ergibt sich dann das Atomgewicht, wenn

Digitized by Google

man weiß, aus wieviel Atomen das Molekül besteht. Mit Rücksicht auf gewisse chemische Tatsachen, auf die wir hier nicht näher eingehen können, nimmt man nun an, daß das Molekül des Wasserstoffs aus zwei Atomen besteht. Setzt man nun das Atomgewicht des Wasserstoffs gleich 1, also das Molekulargewicht gleich 2, und ermittelt mit der Wage, wievielmal ein anderes Gas schwerer als Wasserstoff ist, so ist das doppelte dieser Zahl das Molekulargewicht dieses anderen Gases.

Sauerstoff ist 16 mal so schwer wie Wasserstoff. Also ist das Molekulargewicht des Sauerstoffs 32, und da das Molekül aus zwei Atomen besteht, so ist das Atomgewicht des Sauerstoffs 16.

Phosphordampf ist 62 mal so schwer wie Wasserstoff. Also ist das Molekulargewicht des Phosphors 124. Das Phosphormolekül besteht aber aus vier Atomen. Also ist das Atomgewicht des Phosphors 31.

In ähnlicher Weise wird das Atomgewicht anderer Grundstoffe ermittelt, die im gasförmigen Zustande untersucht werden können. Bei den übrigen Grundstoffen geschieht die Bestimmung durch Analyse ihrer Verbindungen mit denjenigen Grundstoffen, deren Atomgewicht bekannt ist.

Die chemischen Zeichen bedeuten nicht nur die Namen, sondern zugleich auch die Atomgewichte der Elemente. H bedeutet also einen Gewichtsteil Wasserstoff, S bedeutet 32 Gewichtsteile Schwefel u. s. w. Die Zusammensetzung der chemischen Verbindungen läßt sich vermittelst dieser Zeichen in einer sehr einfachen Weise ausdrücken. So wird z. B. die Zusammensetzung der Schwefelsäure durch die Formel H_2SO_4 ausgedrückt. Diese Formel bedeutet, daß die Schwefelsäure aus 2 Gewichtsteilen Wasserstoff, 32 Gewichtsteilen Schwefel und 64 Gewichtsteilen Sauerstoff besteht.

§ 343. Von den zahlreichen chemischen Verbindungen, die durch Vereinigung der Elemente entstehen, sind hier nur einige Hauptgruppen hervorzuheben.

Die sogenannten Säuren haben, wie bereits **Boyle** lehrte, einen sauren Geschmack und verwandeln, wenn sie flüssig oder in Wasser gelöst sind, die blaue Farbe mancher Pflanzenfarbstoffe, z. B. des Lackmus, in Rot. Heutzutage fügt man hinzu, daß die Säuren Wasserstoffverbindungen sind, deren Wasserstoff durch Metalle ersetzt werden kann.

Beispiele.

HCl, Salzsäure (Chlorwasserstoff),
H_2SO_4, Schwefelsäure,
HNO_3, Salpetersäure (Scheidewasser).

Die Gleichung

$$H_2SO_4 + Fe = FeSO_4 + H_2$$

bedeutet, daß bei der Einwirkung von Schwefelsäure auf Eisen das letztere an die Stelle des Wasserstoffs in die Säure eintritt, indem gleichzeitig der Wasserstoff austritt oder „frei“ wird. Die entstehende Verbindung $FeSO_4$

Digitized by Google

ist ein Salz, schwefelsaures Eisen oder Eisensulfat. Bei diesem chemischen Prozeß werden zwei Wasserstoffatome durch ein Eisenatom ersetzt. Daher nennt man den Wasserstoff einwertig und das Eisen zweiwertig. Das Eisenatom ist mit zwei Wasserstoffatomen gleichwertig oder äquivalent.

Die Grundstoffe zerfallen nach der Wertigkeit (Valenz) in verschiedene Gruppen.

Diejenigen Grundstoffe, von denen ein Atom an die Stelle eines Atoms Wasserstoff in eine chemische Verbindung eintreten kann, oder von denen ein Atom mit einem Atom Wasserstoff eine chemische Verbindung bildet, heißen einwertig.

Diejenigen Grundstoffe dagegen, deren Atome zwei Atome Wasserstoff ersetzen oder sich mit zwei Atomen Wasserstoff verbinden können, heißen zweiwertig. Ebenso gibt es dreiwertige, vierwertige u. s. w. Grundstoffe. Einwertig sind z. B. Wasserstoff, Chlor, Brom, Jod, Fluor, Natrium, Kalium, Silber; zweiwertig sind Sauerstoff, Schwefel, Calcium, Baryum, Magnesium, Zink, Blei, Eisen, Quecksilber, Kupfer; dreiwertig sind Stickstoff, Phosphor und Gold; vierwertig Kohlenstoff, Zinn und Platin.

Ein und derselbe Grundstoff kann mit verschiedenen Valenzen auftreten. Das Eisen bildet z. B. zwei Oxyde, FeO, Eisenoxydul, und Fe_2O_3, Eisenoxyd. In der ersten Verbindung ist es zweiwertig, in der zweiten dreiwertig.

Die Kenntnis der Wertigkeit erleichtert in hohem Grade das Verständnis der Formeln, durch welche die Zusammensetzung der chemischen Verbindungen ausgedrückt wird. Der dreiwertige Stickstoff bildet mit dem einwertigen Wasserstoff die Verbindung NH_3 (Ammoniak). Der vierwertige Kohlenstoff bildet mit O_2 die „gesättigte" Verbindung CO_2 (Kohlendioxyd). H_2 bildet mit O die gesättigte Verbindung H_2O (Wasser).

§ 344. Die sogenannten Basen haben nach Boyle die Eigenschaft, die durch eine Säure in Rot verwandelte blaue Farbe des Lackmus wiederherzustellen und die gelbe Farbe von Kurkuma in Braun zu verwandeln.

Basen sind, wie wir jetzt wissen, Hydroxyde, d. h. Verbindungen von Metallen mit der sogenannten Hydroxylgruppe, OH. Diese Atomgruppe ist nicht gesättigt, weil der Sauerstoff zweiwertig und der Wasserstoff einwertig ist. Die Gruppe OH enthält noch eine „freie" Wertigkeit, die bei der Bildung der Base durch ein Metall gesättigt wird. Natriumhydroxyd ist $NaOH$, Kupferhydroxyd $Cu(OH)_2$.

Die meisten Hydroxyde sind in Wasser unlöslich. Löslich sind die Hydroxyde der sogenannten Alkalimetalle (Kalium, Natrium und einige andere seltenere Metalle) und der Erdalkalimetalle (Calcium, Strontium, Baryum und Magnesium). Die Lösungen derselben besitzen einen laugenhaften Geschmack.

§ 345. Bei der Einwirkung einer Säure auf eine Base findet der folgende Vorgang statt:

$$H_2SO_4 + Zn(OH)_2 = 2H_2O + ZnSO_4.$$

Digitized by Google

Das Zink tritt an die Stelle des Wasserstoffs der Schwefelsäure und dieser an die Stelle des Zinks des Hydroxyds. Die beiden neuen Verbindungen sind Wasser und das Zinksalz der Schwefelsäure, schwefelsaures Zink oder Zinksulfat. Wenn zwei Flüssigkeiten, von denen die eine Säure, die andere Hydroxyd (Kaliumhydroxyd, Ätzkali oder Natriumhydroxyd, Ätznatron) enthält, im richtigen Verhältnis vermischt werden, so enthält das Gemisch keine Säure und kein Hydroxyd mehr, sondern nur Salz. Dieser Vorgang der Salzbildung wird Neutralisation genannt.

Säuren, Basen und Salze sind die drei Hauptgruppen von chemischen Verbindungen, die mit Rücksicht auf gewisse physikalische Vorgänge besonders wichtig sind.

§ 346. Daltons Atomtheorie erklärt die Gesetzmäßigkeiten im Bau der chemischen Verbindungen sehr gut, aber sie erklärt nicht, weshalb sich die Atome zu Verbindungen vereinigen.

Demokrit (§ 323), der vor mehr als 2000 Jahren eine bloß auf Spekulation begründete Atomtheorie aufstellte, nahm an, daß sich die Atome infolge der Wirkung von Kräften vereinigen, die zum Wesen der Atome selbst gehören. Auch Robert Boyle spricht von Kräften, die bei chemischen Prozessen zwischen den kleinsten Teilchen der Körper wirksam sind.

Heutzutage nennt man die Ursache, welche den chemischen Prozessen zugrunde liegt, die chemische Affinität oder chemische Verwandtschaft. Das Wort, welches bereits von Albertus Magnus gebraucht wurde, ist nicht sehr glücklich gewählt, weil es die Stoffe, welche sich leicht miteinander vereinigen, als verwandte Stoffe bezeichnet. Stoffe, die eine große chemische Anziehung aufeinander ausüben, sind aber in ihren Eigenschaften nicht ähnlich, sondern im Gegenteil sehr verschieden. Über das eigentliche Wesen der Affinität weiß man nichts näheres. Man weiß nur, daß sie auf sehr geringe Entfernungen wirksam ist und daß sie von der Wärme, dem Licht und der Elektrizität beeinflußt wird. Die Stoffe, welche chemisch aufeinander wirken sollen, bringt man womöglich in den flüssigen (geschmolzenen oder gelösten) Zustand, weil sich in diesem Zustande die Moleküle einander mehr annähern können als im festen Zustande. Aber auch in anderer Weise kann man bewirken, daß sich die Affinität geltend macht. Kupfer wird bei gewöhnlicher Temperatur von Schwefelsäure fast gar nicht angegriffen. In heißer Schwefelsäure dagegen löst es sich unter Bildung von Kupfersulfat und Schwefeldioxyd auf.

Ebenso wie die Wärme kann auch das Licht den Anstoß zu chemischen Vorgängen geben. Mischt man in einem dunkeln Zimmer gleiche Raumteile der gasförmigen Elemente Wasserstoff und Chlor, so vereinigen sie sich nicht. Setzt man aber das Gemisch der Einwirkung des Sonnenlichtes aus, so vereinigen sich die beiden Elemente unter Explosion zu Chlorwasserstoff. Dasselbe findet statt, wenn man einen elektrischen Funken durch das Gasgemisch springen läßt.

Aus diesen Beispielen geht hervor, daß die Naturkräfte Wärme, Licht

Digitized by Google

und Elektrizität einen großen Einfluß auf diejenige Naturkraft ausüben, die man Affinität nennt.

Wärme, Licht und Elektrizität können aber nicht nur die Entstehung chemischer Verbindungen bewirken, sondern sie können auch das gerade Gegenteil, das Zerfallen der Verbindungen in ihre Bestandteile, bewirken, also die chemische Affinität aufheben. Wasserdampf zerfällt in Wasserstoff und Sauerstoff, wenn er auf 2000 bis 3000° erhitzt wird. Die Salpetersäure erleidet durch das Licht eine Zersetzung. Die Photographie beruht darauf, daß das in der lichtempfindlichen Platte enthaltene Silbersalz durch das Licht zersetzt wird.

§ 347. Wenn von der chemischen Wirkung der Elektrizität die Rede ist, so denkt man gewöhnlich in erster Linie an den elektrischen Strom. Allein man darf nicht vergessen, daß der elektrische Funke ebenfalls ein Strom, nämlich ein hochgespannter Strom von sehr kurzer Dauer ist.

Die ältesten Beobachtungen über die chemischen Wirkungen der Elektrizität knüpfen sich an die Entladungen der Elektrisiermaschinen und Leidener Flaschen. Die Resultate waren jedoch sehr unsicher und für die spätere Forschung von geringer Bedeutung. Wir wollen uns daher nicht ausführlich mit ihnen beschäftigen. Es mag nur erwähnt werden, daß bereits 1789 zwei holländische Forscher mitteilten, daß das Wasser durch eine kräftige elektrische Entladung in brennbare Luft (Wasserstoff) und Lebensluft (Sauerstoff) zerlegt wird. Noch früher hatte Beccaria die Bildung von metallischem Zink beobachtet, als er elektrische Funken zwischen zwei Stücken Zinkkalk (Zinkoxyd) überspringen ließ.

Eine größere Sicherheit kam in das Studium dieser Erscheinungen erst mit der Entdeckung des durch Elemente erzeugten elektrischen Stromes. Zu den ersten Entdeckungen von Nicholson und Carlisle, sowie von Ritter (§ 316 bis 318), kamen alsbald neue Beobachtungen von großer Tragweite, die zur Grundlage einer neuen Wissenschaft, der Elektrochemie, geworden sind.

§ 348. In den ersten Jahren des 19. Jahrhunderts wurde von vielen Physikern nachgewiesen, daß Salzlösungen durch den elektrischen Strom so zerlegt werden, daß sich das Metall (wie der Wasserstoff bei der Wasserzersetzung) am negativen Pol abscheidet. (Das Metall geht mit dem Strom, vergl. Fig. 268.) Bei diesen Untersuchungen boten sich verschiedene Fragen über die durch den elektrischen Strom bewirkte Zerlegung chemischer Verbindungen. Warum treten z. B. bei der Wasserzersetzung der Wasserstoff und der Sauerstoff nur an den Polen auf? Und stammt der Wasserstoff, der sich an dem einen Pol und der Sauerstoff, der sich gleichzeitig an dem anderen Pol abscheidet, von denselben oder von verschiedenen Wassermolekülen her?

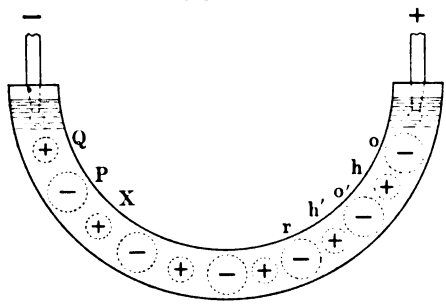
Der erste Versuch, den Vorgang der Wasserzersetzung theoretisch zu erklären, wurde von Grotthuß gemacht. Er war 1785 als Sohn eines kurländischen Edelmannes in Leipzig geboren, studierte seit 1803 zuerst in Leipzig, dann in Paris, wo Berthollet und Fourcroy seine Lehrer waren, und zuletzt in Neapel, wo er seine Theorie der galvanischen Wasserzersetzung ausarbeitete. Von 1807 bis zu seinem Tode — er starb in einem Alter von

Digitized by Google

nur 37 Jahren — lebte er, eifrig mit physikalischen Studien beschäftigt, auf seinem Erbgute Geddutz.

Grotthuß veranschaulichte seine Ansicht über die Wasserzersetzung durch die in Fig. 278 wiedergegebene Zeichnung. Die Poldrähte einer galvanischen Batterie sind in ein mit angesäuertem Wasser gefülltes gebogenes Glasrohr eingetaucht. Er verglich das galvanische Element mit einem Magneten, der einen positiven (+) und einen negativen (—) Pol hat, und nahm an, daß das Wassermolekül eine ähnliche Polarität besitzt, so daß der Wasserstoff positiv und der Sauerstoff negativ elektrisch ist. Wird nun ein elektrischer Strom durch das Wasser gesandt, so macht sich die Polarität der Wassermoleküle geltend und diese ordnen sich in der durch die Figur angedeuteten Weise an. Die Sauerstoffatome wenden sich dem positiven Pol, die Wasserstoffatome dem negativen Pol zu. Das Wassermolekül am positiven Pol spaltet sich nun, der Sauerstoff *o* wird frei, aber der Wasserstoff *h* verbindet sich sofort mit dem Sauerstoff *o'* des nächsten Wassermoleküls. Der Wasserstoff *h'* dieses Moleküls verbindet sich mit dem Sauerstoff *r* des folgenden Wassermoleküls u. s. w. Der Wasserstoff *Q* desjenigen Moleküls, welches sich am negativen Pol befindet, wird an diesem Pol ausgeschieden. Grotthuß nahm also an, daß durch die ganze Flüssigkeit hindurch eine Spaltung der Wassermoleküle stattfindet, und daß sich die Wasserstoffatome und die Sauerstoffatome zu neuen Molekülen vereinigen. Von den Endmolekülen gibt das eine seinen Sauerstoff, das andere seinen Wasserstoff ab. Sobald dies stattgefunden hat, drehen sich die Wassermoleküle, so daß sie von neuem dem positiven Pol den Sauerstoff und dem negativen Pol den Wasserstoff zuwenden.

Fig. 278.



Grotthuß' Erklärung der Wasserzersetzung.

Die Grotthußsche Erklärung der Wasserzersetzung war lange Zeit die beste, welche man hatte. Sie hatte den großen Vorzug, daß sie leicht verständlich war. Man hat sie jedoch mit Rücksicht auf gewisse Erscheinungen, die mit ihr in Widerspruch stehen, später durch eine andere Theorie ersetzt (§ 355).

§ 349. Für die chemische Wirkung des elektrischen Stromes die richtige Erklärung zu finden, war auch namentlich deshalb von besonderem Interesse, weil das galvanische Element selbst nur so lange wirksam ist, als in ihm ein chemischer Vorgang stattfindet. Es war nicht zu verkennen, daß die elektrischen und die chemischen Erscheinungen in einem sehr engen Zusammenhange stehen, und es war schwierig, wenn nicht unmöglich, zu entscheiden, welche von beiden man als Ursache, und welche als Wirkung ansehen sollte,

Digitized by Google

oder ob vielleicht beide als Wirkungen einer und derselben Ursache aufgefaßt werden mußten.

Nach Voltas Ansicht lag die Quelle der Elektrizität der galvanischen Elemente in der Berührung der verschiedenen Körper, aus denen die Elemente bestehen. Er wußte, daß das Wasser in den Elementen salzhaltig oder säurehaltig sein muß. Ein Element, welches nur reines Wasser enthält, gibt keinen Strom. Dies erklärte er, ebenso wie früher Cavendish, einfach durch den Umstand, daß reines Wasser die Elektrizität nicht leitet. Es ist nicht möglich, reines Wasser durch den elektrischen Strom zu zerlegen, weil sich der Strom einer galvanischen Batterie nicht durch Wasser treiben läßt. Volta konnte zur Begründung seiner Auffassung auf die Tatsache hinweisen, daß in vielen Fällen zwischen Metallen und säurehaltigen Flüssigkeiten eine starke chemische Wirkung, dabei aber doch nur eine sehr geringe Elektrizitätsentwickelung stattfindet. Die Ansicht Voltas über den Sitz der Elektrizitätsquelle blieb längere Zeit die herrschende. Später machte sich jedoch der Einfluß der elektrochemischen Forscher, mit H. Davy und Berzelius an der Spitze, in höherem Grade geltend.

§ 350. Davy erkannte, daß die Verhältnisse bei der Zerlegung salzhaltiger und säurehaltiger Lösungen oft ziemlich verwickelt sind. Man hatte gefunden, daß bei der Wasserzersetzung stets am positiven Pol eine Säure und am negativen Pol eine Base auftritt, und man nahm an, daß sowohl die Säure als auch die Base zum Teil aus „Elektrizität" besteht. Davy wies durch eine Reihe vortrefflich ausgeführter Versuche nach, daß, wenn bei der Wasserzersetzung eine Säure und eine Base auftrat, das Wasser stets salzhaltig war, teils weil das Wasser nicht genügend durch Destillation gereinigt war, teils weil ein Bestandteil des Gefäßes, durch das der Strom ging, vom Wasser gelöst wurde. Wenn aber ein Salz anwesend ist, so wird dies durch den Strom zerlegt, und der eine Teil wird an den positiven, der andere an den negativen Pol geführt. Davy zeigte z. B., daß, wenn man den Strom durch eine Lösung von Kaliumsulfat gehen läßt, am negativen Pol Kaliumhydroxyd und am positiven Pol Schwefelsäure auftritt.

Diese chemischen Vorgänge fanden ihre Erklärung durch die Entdeckung der Alkalimetalle, Kalium und Natrium. Man vermutete, daß die unter dem Namen Kali und Natron bekannten Substanzen zusammengesetzte Körper, und zwar Metallverbindungen seien. Davy suchte sie zunächst durch Einwirkung des elektrischen Stromes auf wässerige Lösungen zu zersetzen, was jedoch nicht gelang. Dann erhitzte er trockenes Kali auf einem Platinblech, verband dieses mit dem negativen Pol einer starken galvanischen Batterie und tauchte einen mit dem positiven Pol verbundenen Platindraht in das geschmolzene Kali ein. Am negativen Pol zeigte sich ein strahlendes Licht, welches von einem ausgeschiedenen brennbaren Stoffe herrührte. Um das Verbrennen desselben zu verhüten, vertauschte er die Pole und benutzte einen so starken Strom, daß durch diesen das Kali geschmolzen wurde. Dann entstanden auf dem Platinblech (vom geschmolzenen Kali bedeckt) kleine quecksilberartige Metall-

Digitized by Google

kügelchen, die an der Luft schnell anliefen und sich wieder in Kali verwandelten.

Die Metallkügelchen bestanden aus Kalium. Dieses läßt sich nicht auf nassem Wege, d. h. durch Einwirkung des Stromes auf die wässerige Lösung des Hydroxyds, darstellen, weil es eine so große Affinität zum Sauerstoff hat, daß es das Wasser zerlegt, indem es sich mit dem Sauerstoff verbindet und den Wasserstoff frei macht. Wenn man ein Stückchen Kalium auf Wasser wirft, so entzündet sich der Wasserstoff infolge der durch den chemischen Vorgang erzeugten Wärme.

Daß bei der Zerlegung von Kaliumsulfat am negativen Pol außer dem Wasserstoff auch Kaliumhydroxyd und am positiven Pol außer dem Sauerstoff auch Schwefelsäure auftritt, ist nun leicht zu erklären.

Die Zusammensetzung des Kaliumsulfats wird durch die Formel K_2SO_4 ausgedrückt. Das am negativen Pol auftretende Kalium wirkt auf das Wasser so ein, daß Kaliumhydroxyd und freier Wasserstoff entsteht:

$$K_2 + 2H_2O = 2KOH + H_2.$$

Der Säurerest SO_4, welcher am positiven Pol abgeschieden wird, bewirkt ebenfalls eine Zersetzung des Wassers, und zwar so, daß Schwefelsäure und freier Sauerstoff entsteht:

$$SO_4 + H_2O = H_2SO_4 + O.$$

Der bei der Zerlegung von Kaliumsulfat entstehende Wasserstoff und Sauerstoff entstehen also nicht durch Spaltung des Wassers in seine beiden Bestandteile, sondern infolge „sekundärer" Prozesse. Diese Prozesse hat man sorgfältig zu beachten, um den Vorgang der elektrischen Zerlegung zu verstehen. Reines Wasser leitet den elektrischen Strom nicht und wird daher auch nicht durch den Strom zerlegt. Wird dagegen dem Wasser etwas Schwefelsäure zugesetzt, so leitet es den Strom und wird durch den Strom in seine beiden Bestandteile zerlegt oder, besser gesagt, die beiden Bestandteile, Wasserstoff und Sauerstoff, sammeln sich an den Polen in solchen Mengen an, als ob eine direkte Spaltung des Wassers stattfände. Das, was unter Bildung von Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt und fortwährend wieder zurückgebildet wird, ist aber nicht das Wasser, sondern die Schwefelsäure, H_2SO_4. Diese wird durch den elektrischen Strom in H_2 und SO_4 zerlegt. Der Wasserstoff scheidet sich am negativen Pol ab. Am positiven Pol entsteht infolge der Einwirkung von SO_4 auf H_2O Schwefelsäure und freier Sauerstoff.

Davy entdeckte auch das Metall Natrium, welches in seinen Eigenschaften große Ähnlichkeit mit dem Kalium hat. Er erhielt es durch Einwirkung des elektrischen Stromes auf geschmolzenes Natron (Natriumhydroxyd). Später gelang es ihm, auch die sogenannten Erdalkalimetalle in derselben Weise aus ihren Sauerstoffverbindungen darzustellen.

Digitized by Google

§ 351. Die Entdeckungen Davys erregten überall das größte Aufsehen, und die französische Akademie ehrte den Entdecker, indem sie ihm bereits bei dem Erscheinen der ersten Abhandlung den Preis verlieh, den Napoleon für die beste Arbeit über den Galvanismus ausgesetzt hatte. Von der Aufnahme des elektrischen Stromes unter die Hilfsmittel der Experimentalchemie versprach man sich große Erfolge.

Es verging jedoch eine Reihe von Jahren, bis die glänzenden Entdeckungen Davys eine Fortsetzung fanden. Die elektrochemischen Theorien von Davy und Berzelius (oder von Schweigger und Gmelin) waren nicht geeignet, zu neuen fruchtbaren Untersuchungen anzuregen.

Davys elektrochemische Theorie war kurz die folgende. Die chemischen Verbindungen entstehen und zerfallen infolge elektrischer Anziehungen und Abstoßungen. Was Volta an den Metallen beobachtet hatte, daß nämlich ein Spannungsunterschied entsteht, wenn sich zwei Metalle berühren, gilt für alle Körper, die eine chemische Anziehung aufeinander ausüben. Die Zerlegung vermittelst des elektrischen Stromes erklärte er durch die Annahme, daß die Stoffe eine solche Zufuhr von Elektrizität erfahren, daß sie in den „freien" Zustand kommen, daß sie also entweder positive oder negative Elektrizität aufnehmen und sich daher nach dem negativen oder dem positiven Pol hinbewegen. Kalium ist z. B. stark positiv, Sauerstoff stark negativ elektrisch, und die Stoffe lassen sich nach ihrer Elektrizität in eine Reihe ordnen. Davys Theorie ist nichts anderes als eine Erweiterung der Voltaschen Berührungstheorie. Was den Vorgang der chemischen Zerlegung betrifft, so schließt sich Davy den Entwickelungen von Grotthuß an.

In höherem Grade als Davy war der schwedische Chemiker Jakob Berzelius (1779 bis 1848) an der Ausbildung der ersten elektrochemischen Theorien beteiligt. Der Grund davon liegt darin, daß Berzelius mehr als irgend ein anderer Chemiker Schule machte, teils durch seine zahlreichen vorzüglichen Arbeiten, teils durch seine berühmten Schüler, z. B. Mitscherlich. Im zweiten Jahrzehnt des vorigen Jahrhunderts bildete Stockholm den Mittelpunkt des chemischen Studiums.

Berzelius und seine Schüler haben sich das große Verdienst erworben, die von Dalton aufgestellte Hypothese durch sorgfältige Versuche bestätigt zu haben. Berzelius trat in Lavoisiers Fußstapfen, indem er die Wage in der Chemie zu ihrem vollen Rechte kommen ließ, und er bahnte den Weg für die Anwendung der analytischen Chemie auf die organischen Stoffe, indem er neue Arbeitsmethoden angab, durch welche die Zusammensetzung dieser Stoffe mit Hilfe der Wage ermittelt werden konnte.

Seine elektrochemischen Untersuchungen begann er bereits im Jahre 1802, allein er reichte auf diesem Gebiete nicht an Davy heran. Der Einfluß, den Berzelius auf dem Gebiete der Elektrochemie ausgeübt hat, beruht nicht auf seinen Experimentaluntersuchungen, sondern auf der elektrochemischen Theorie, die er in der zweiten Auflage seines berühmten Lehrbuches der Chemie, die im Jahre 1818 erschien, veröffentlicht hat.

Digitized by Google

Berzelius dachte sich im Gegensatz zu Davy, daß die Atome der Grundstoffe zwei verschiedene elektrische Pole besitzen, die aber ungleich stark sind, und daß die chemische Anziehung zwischen Stoffen stattfindet, die entgegengesetzte Elektrizität im Überschuß enthalten. Berzelius hatte also nicht nötig, die chemische Anziehung als eine Folge der Berührungselektrizität zu betrachten, und konnte sich in dieser Hinsicht freier bewegen als Davy. Allein seine Theorie erfordert, daß die Grundstoffe an und für sich entweder positiv oder negativ elektrisch sind. Ein Beweis für diese Annahme ist aber weder von Berzelius, noch auch von späteren Forschern geliefert worden. Berzelius teilte ebenso wie Davy die Stoffe nach ihrem Verhalten bei der elektrischen Zerlegung in elektropositive und elektronegative.

§ 352. Durch die Entdeckungen Davys wurden zwar zahlreiche Forscher veranlaßt, sich dem Gebiete der Elektrochemie zuzuwenden, aber trotzdem wurde in den nächsten 20 Jahren keine nennenswerte Entdeckung auf diesem Gebiete gemacht. Auch die Theorie machte in diesem Zeitraume keine Fortschritte. In den zwanziger Jahren war es, wie wir bald sehen werden, ein ganz anderes Gebiet der Elektrizitätslehre, welches die allgemeine Aufmerksamkeit auf sich zog. Der nächste große Fortschritt auf dem Gebiete der Elektrochemie knüpft sich an den Namen von Davys Schüler und Nachfolger Michael Faraday. Seine berühmte Abhandlung über die chemische Wirkung des elektrischen Stromes legte er der Royal Society im Januar 1834 vor.

Um über die bei seinen Untersuchungen in Betracht kommenden physikalisch-chemischen Verhältnisse klar sprechen zu können, führte er eine Reihe von neuen Bezeichnungen ein, die allgemein in Gebrauch gekommen sind. Die Pole, d. h. diejenigen Stellen, an denen der elektrische Strom bei der elektrischen Zerlegung von Verbindungen eintritt und austritt, nannte er Elektroden, und zwar den positiven Pol Anode, den negativen Pol Kathode. Ein Stoff, der sich durch den elektrischen Strom zerlegen läßt, heißt Elektrolyt, und der Vorgang der Zerlegung Elektrolyse. Auch die Stoffe, welche sich bei der Elektrolyse an den Polen abscheiden, bezeichnete Faraday mit besonderen Namen. Früher hatte man sie als elektropositiven und elektronegativen Bestandteil der Verbindung bezeichnet. Faraday nannte denjenigen Teil des Elektrolyten, welcher nach der Anode „wandert", das Anion, denjenigen Teil, welcher nach der Kathode wandert, das Kation (nach dem griechischen Worte ἰων, wandernd). Anion und Kation heißen mit gemeinsamem Namen die Jonen. Bei der Elektrolyse von Kupfersulfat, $CuSO_4$, z. B. ist Cu das Kation, SO_4 das Anion.

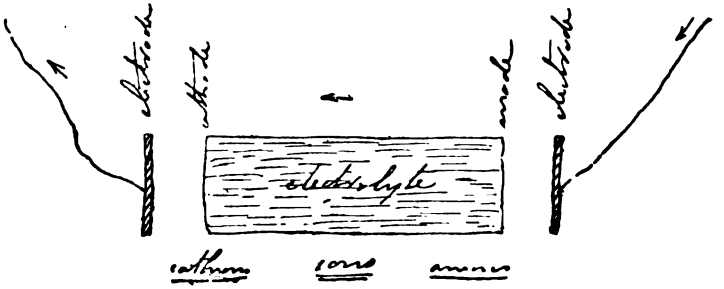
§ 353. Faraday untersuchte die chemische Wirkung des elektrischen Stromes viel eingehender, als es früher geschehen war. Er fand, daß ein elektrischer Strom von bestimmter Stärke in einer gewissen Zeit immer dieselbe Menge eines Elektrolyten zerlegt. Ein Strom zerlegt z. B. immer dieselbe Menge Wasser, einerlei ob die Elektroden größer oder kleiner sind oder ob das Wasser mehr oder weniger Säure (oder gelöstes Salz) enthält. Dies wies er dadurch nach, daß er einen elektrischen Strom durch eine Reihe von

Digitized by Google

Wasserzersetzungsapparaten gehen ließ, in denen die Elektroden verschiedene Größe hatten und in denen dem Wasser ungleiche Säuremengen zugesetzt waren.

Eine andere Frage war die, welcher Zusammenhang zwischen der chemischen Arbeit und der Stärke des elektrischen Stromes besteht. Faraday

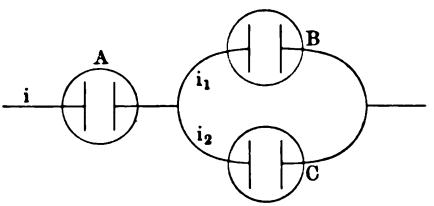
Fig. 279.



Faradays Zeichnung zu den elektrolytischen Benennungen.

führte, um diese Frage zu beantworten, den folgenden Versuch aus. A, B und C (Fig. 280) sind drei Wasserzersetzungsapparate. Der Strom i einer galvanischen Batterie geht ungeteilt durch A, teilt sich dann in zwei Teile i_1 und i_2, von denen der erste durch B und der zweite durch C geht. Dann vereinigen sich die beiden Teilströme wieder und gehen zurück zur Batterie. Die beiden Ströme i_1 und i_2 sind offenbar zusammen ebenso stark wie der Strom i, und es zeigte sich, daß in den beiden Apparaten B und C zusammen dieselbe Menge Wasserstoff entwickelt wurde wie in dem Apparate A. Hieraus zog Faraday den wichtigen Schluß, daß die chemische Arbeit des elektrischen Stromes in demselben Verhältnis wie die Stromstärke wächst. Ein Strom, der doppelt so stark ist wie ein anderer, leistet die doppelte Arbeit wie dieser. Unter der Stromstärke ist die Elektrizitätsmenge zu verstehen, welche der Strom mit sich führt.

Fig. 280.



Faradays elektrolytisches Gesetz.

§ 354. Faraday machte ferner die Entdeckung, daß, wenn ein Strom zu gleicher Zeit zwei Körper zerlegt, äquivalente Mengen dieser Körper zerlegt werden. Werden z. B. Wasser und Silbernitrat zerlegt, so werden äquivalente Mengen Wasserstoff und Silber abgeschieden. Da Wasserstoff und Silber beide einwertig sind (vgl. § 343), so ist die Abscheidung äquivalenter Mengen gleichbedeutend mit der Abscheidung einer gleichen Anzahl von Atomen. Da das Atomgewicht des Wasserstoffs 1 und das Atomgewicht des Silbers 107,9 ist, so werden 107,9 g Silber in derselben Zeit abgeschieden, in welcher 1 g

Digitized by Google

Wasserstoff abgeschieden wird. — Die Zersetzung des Silbersalzes wird am besten in einer Platinschale vorgenommen. In die Salzlösung wird ein Silberstab so eingetaucht, daß er die Schale nicht berührt, und der Strom wird so geschlossen, daß der Silberstab die Anode und die Platinschale die Kathode bildet. Das Silbernitrat, $AgNO_3$, wird in Ag und NO_3 zerlegt. Das Silber scheidet sich als Kation am Platin ab, während sich der Säurerest NO_3 als Anion an dem Silberstabe abscheidet, wo es die Bildung von Silbernitrat bewirkt. Die Stärke der Silbernitratlösung ändert sich nicht. Man kann also sagen, daß durch den Strom Silber von dem in die Lösung eingetauchten Stabe nach der Platinschale übergeführt wird.

Bei der Zerlegung von Kupfersulfat werden äquivalente Mengen von Wasserstoff und Kupfer ausgeschieden. Das Kupfer ist zweiwertig und sein Atomgewicht ist 63,6. Also werden 63,6 g Kupfer ausgeschieden, während 2 g Wasserstoff ausgeschieden werden.

Mit Hilfe der Tabelle auf S. 361 und mit Rücksicht auf die Wertigkeit der Metalle (§ 343) kann man auch für andere Metalle die Menge angeben, die durch einen elektrischen Strom aus einer Salzlösung ausgeschieden wird, während der Strom in einem Wasserzersetzungsapparate eine gewisse Menge Wasserstoff ausscheidet.

Faraday gab durch seine elektrolytischen Gesetze einen klaren Ausdruck für die Erscheinungen der Elektrolyse und eine sichere Grundlage für die Messung der Stromstärke. Untersucht man z. B. zwei Ströme, und findet, daß der eine Strom dreimal so viel Wasserstoff entwickelt als der andere in derselben Zeit, so ist dieser Strom dreimal so stark als der andere. Ein Wasserzersetzungsapparat, der zum Messen der Stromstärke benutzt wird, heißt ein Voltameter. Derartige Apparate waren lange vor Faradays Zeit in Gebrauch, aber erst Faraday gab die richtige Erklärung für ihre Wirkung. Selbstverständlich kann auch ein Apparat, in welchem Silbernitrat zerlegt wird, als Strommesser dienen. Ein solcher Apparat wird als Silbervoltameter bezeichnet.

§ 355. Wir wollen auf die theoretischen Betrachtungen Faradays über den Verlauf der Elektrolyse nicht näher eingehen. Dagegen soll in Kürze erklärt werden, in welcher Weise dieser Vorgang heutzutage aufgefaßt wird.

Die Grotthußsche Theorie der Elektrolyse war auf die Dauer unhaltbar. Sie verlangte, daß die Elektrolyse erst dann eintritt, wenn der Strom eine gewisse Kraft erlangt hat, denn die Elektrolyse begann ja nach Grotthuß damit, daß sämtliche Moleküle in der Strombahn gespalten wurden. Ein anderer Umstand, der sich mit Hilfe der Grotthußschen Theorie nicht erklären läßt, ist der, daß der elektrische Strom die Lösung des Elektrolyten an der Anode und an der Kathode verändert. In dem folgenden Schema soll *A* die Anode und *K* die Kathode vorstellen. Der Elektrolyt sei Kupfersulfat. Bevor die Elektrolyse beginnt, befindet sich der Elektrolyt in einem Zustande, der in folgender Weise veranschaulicht werden kann:

Digitized by Google

$$A \left\{ \begin{matrix} Cu & Cu & Cu & & Cu & Cu & Cu \\ SO_4 & SO_4 & SO_4 & & SO_4 & SO_4 & SO_4 \end{matrix} \right\} K.$$

Hier stehen (nach einer Darstellungsweise, die zuerst von Berzelius benutzt wurde) die verbundenen Anionen und Kationen über- und untereinander. In der Mitte befindet sich eine poröse Scheidewand, durch welche die Elektrolyse nicht gehindert wird. Wenn nun der elektrische Strom in der Richtung von *A* nach *B* durch die Flüssigkeit geht, so wandert das Kupfer als Kation nach *K* und der Säurerest SO_4 als Anion nach *A*. Man kann sich die Bewegung der Jonen als parallele (horizontale) Verschiebungen vorstellen. Nach kurzer Zeit ist der Zustand, in dem sich der Elektrolyt befindet, der folgende:

$$A \left\{ \begin{matrix} & Cu & Cu & & Cu & Cu & 2\,Cu \\ 2\,SO_4 & SO_4 & SO_4 & & SO_4 & SO_4 & \end{matrix} \right\} K.$$

Es befindet sich also auf jeder Seite der Scheidewand ein Molekül $CuSO_4$ weniger, und es ist ein Anion Cu von links nach rechts und ein Kation SO_4 von rechts nach links durch die Scheidewand hindurchgegangen. In dieser Weise würde die Erscheinung nach der Theorie von Grotthuß verlaufen, wenn sich die Jonen gleich schnell bewegten. — Aber der Versuch lehrt, daß während der Elektrolyse die gleichmäßige Zusammensetzung, die die Flüssigkeit anfangs hatte, eine Störung erleidet. Pouillet fand z. B. bei der Elektrolyse einer Chlorgoldlösung, daß die Flüssigkeit an der Kathode fast ganz goldfrei wurde, trotzdem noch eine bedeutende Menge Gold in der Lösung enthalten war.

Diese eigentümlichen Erscheinungen ließen sich mit Hilfe der Grotthußschen Theorie nicht erklären. Um die Theorie der Wanderung der Jonen den erwähnten Versuchen anzupassen, mußte eine sehr kühne Hypothese aufgestellt werden. Auch nach der Grotthußschen Theorie wanderten und drehten sich die Jonen, allein die Erklärung hatte doch etwas anschauliches, indem die benachbarten Moleküle unmittelbar aufeinander einwirkten, während sich Anion und Kation nach entgegengesetzten Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit bewegten. Wenn aber die Beobachtungen von Pouillet und anderen Physikern durch die Theorie der Wanderung der Jonen erklärt werden sollten, so mußte angenommen werden, daß sich Anion und Kation mit verschiedener Geschwindigkeit bewegen. Diese Annahme gemacht und durch Versuche bestätigt zu haben, ist das Verdienst Wilhelm Hittorfs.

Wir wollen die Betrachtungen Hittorfs auf Pouillets Elektrolyse des Chlorgoldes anwenden. Bevor die Elektrolyse beginnt, ist die Lösung auf beiden Seiten der Scheidewand gleichartig:

$$A \left\{ \begin{matrix} Au & Au & Au & & Au & Au & Au \\ Cl_3 & Cl_3 & Cl_3 & & Cl_3 & Cl_3 & Cl_3 \end{matrix} \right\} K.$$

Digitized by Google

Nimmt man nun z. B. an, daß sich die Anionen während der Elektrolyse doppelt so schnell bewegen wie die Kationen, so wird der Zustand der Lösung alsbald der folgende sein:

$$A \left\{ \begin{matrix} & Au & Au & Au & 3\,Au \\ 3\,Cl_3 & Cl_3 & Cl_3 & Cl_3 & \end{matrix} \right\} K.$$

Während zwei Anionen durch die Scheidewand gegangen sind, ist nur ein Kation hindurchgegangen. Jetzt ist die Lösung an der Kathode ärmer an Gold (Au) als die Lösung an der Anode. Die drei Goldatome 3 Au haben sich nämlich an der Kathode abgeschieden und befinden sich also nicht mehr in der Lösung.

§ 356. Hittorf (geb. 1824 in Bonn, seit 1852 Professor in Münster) veröffentlichte seine erste Abhandlung über diesen Gegenstand im Jahre 1853,

Fig. 281.

Wilhelm Hittorf.

allein seine Hypothese, daß sich die Jonen mit ungleicher Geschwindigkeit bewegen, fand keinen Anklang, trotzdem er sie durch lange Versuchsreihen begründet hatte. Die Geschwindigkeit der Jonen ermittelte er durch Analyse der Lösung an den Elektroden.

Einige Jahre später trat R. Clausius (§ 179) mit einer neuen Betrachtung über den Zustand in elektrolytischen Flüssigkeiten an die Öffentlichkeit. Er nahm an, daß in einer Salzlösung die Moleküle des gelösten Salzes

Digitized by Google

in lebhafter Bewegung sind (vgl. die kinetische Gastheorie, § 188), und zwar so, daß sie sich gleichmäßig nach allen Richtungen bewegen. Ein Teil der Salzmoleküle ist nun nach dieser Theorie in die Jonen zerfallen, auch wenn kein Strom durch die Lösung geht. Diese Jonen bewegen sich ebenfalls in allen Richtungen. Wenn kein Strom durch die Lösung geht, so ändert sich der Zustand derselben nicht. Es entstehen zwar fortwährend beim Aneinanderprallen der Moleküle freie Jonen, aber diese vereinigen sich, wenn sie sich begegnen, wieder zu Molekülen. Sobald aber ein Strom durch die Flüssigkeit geht, kommt zu der Geschwindigkeit der Jonen eine Komponente hinzu, und zwar bei den Anionen in der Richtung nach der Anode, bei den Kationen in der Richtung nach der Kathode. Die Folge davon ist, daß sich die Jonen an den in die Flüssigkeit eingetauchten Elektroden ansammeln.

Die Theorie von Hittorf und Clausius hat sich bewährt und ist in den letzten Jahrzehnten weiter ausgebildet worden, namentlich von Svante Arrhenius und Wilhelm Ostwald. Es würde uns jedoch zu weit führen, wenn wir auf die Schriften dieser beiden Forscher näher eingehen wollten.

§ 357. Die chemische Wirkung des elektrischen Stromes findet in der Technik eine sehr vielseitige Anwendung.

Im Jahre 1837 kam M. H. Jacobi (geb. 1801 in Potsdam, gest. als Staatsrat in Petersburg 1874), der damals Professor der Baukunst in Dorpat war, auf den Gedanken, die galvanische Metallausscheidung für technische Zwecke zu benutzen. Er beobachtete beim Ausfällen von Kupfer an einer Kupferelektrode, daß die ausgefällte Schicht eine zusammenhängende Masse bildete, die sich von der Elektrode ablösen ließ und die Form derselben bis in die kleinsten Einzelheiten wiedergab. Jacobi nahm in dieser Weise Abdrücke von Kupferstichplatten, Münzen, Medaillen, Basreliefs u. s. w. Die Formen waren vorzüglich wiedergegeben, aber natürlich „umgekehrt", d. h. da, wo der Gegenstand eine Erhöhung hatte, hatte der Abdruck eine Vertiefung, und umgekehrt. Er nahm daher von der Form, die kopiert werden sollte, einen Abdruck mit Wachs oder Gips. In diese umgekehrte Form wurde dann das Kupfer niedergeschlagen, nachdem die Oberfläche derselben durch Bestreichen mit feinem Graphitpulver für den elektrischen Strom leitend gemacht worden war. In eine Lösung von Kupfersulfat wird dann als Kathode diese Form und als Anode ein Kupferstab eingetaucht. Läßt man dann einen elektrischen Strom durch die Lösung gehen, so überzieht sich die Form mit einer Kupferschicht, die den Gegenstand, von dem die Form genommen wurde, sehr genau wiedergibt. Ebensoviel Kupfer, wie an der Kathode ausgeschieden wird, wird an der Anode gelöst, so daß die Stärke der Salzlösung keine Veränderung erleidet. Wenn das ausgeschiedene Kupfer eine zusammenhängende Masse bilden soll, so muß der Strom schwach sein, d. h. das Metall muß sich langsam ausscheiden.

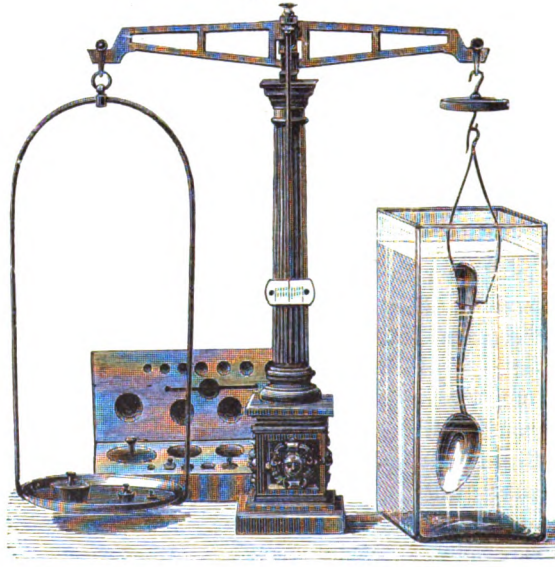
Dies Verfahren, die sogenannte Galvanoplastik, wurde außer von Jacobi auch von Spencer in England erfunden. Ausgedehnte Anwendung

Digitized by Google

findet die Galvanoplaſtik in der Illuſtrationstechnik zur Herſtellung der Galvanos, d. h. kupferner Nachbildungen von Holzſchnitten, die durch die Buchdruckerpreſſe vervielfältigt werden ſollen.

Derſelbe chemiſche Prozeß, auf dem die Galvanoplaſtik beruht, läßt ſich auch zur Herſtellung von Kupferſtichplatten und Stahlſtichplatten benutzen. Die Platte, welche „geſtochen“ werden ſoll, wird mit Firnis überzogen, und in dieſen wird das Bild, von dem man einen „Stich“ haben will, in der Weiſe eingezeichnet, daß man an den dunkeln Stellen des Bildes den Firnis mit einem Metallſtift entfernt. Man legt die ſo bearbeitete Kupferplatte in

Fig. 282.



Verſilberungswage.

eine Kupferſulfatlöſung und läßt einen ſchwachen elektriſchen Strom auf ſie einwirken, und zwar ſo, daß die Platte die Anode bildet. An denjenigen Stellen, an denen der Firnis entfernt worden iſt, wird dann Kupfer gelöſt und man erhält einen „Stich“ des betreffenden Bildes.

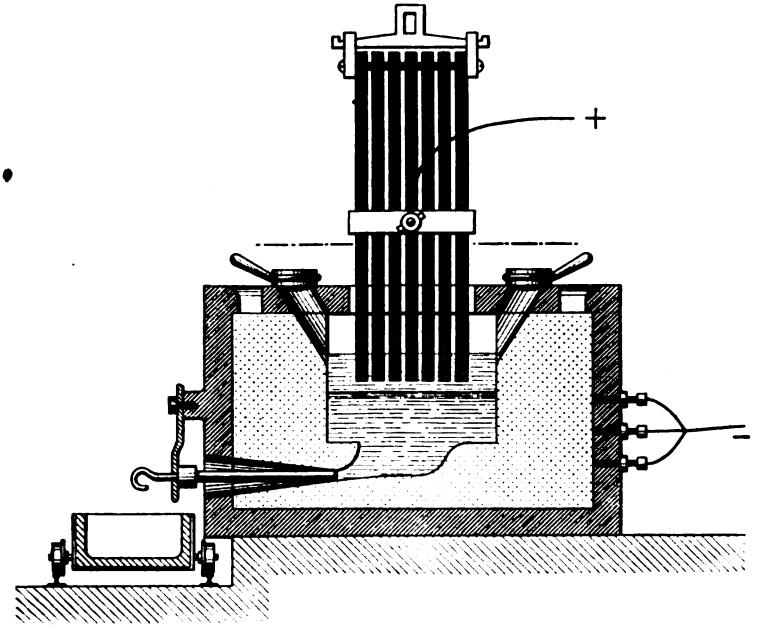
Die ſogenannte Galvanoſtegie oder, wie man gewöhnlich ſagt, das Galvaniſieren, beſteht in der Ausſcheidung einer dünnen Metallſchicht auf einem anderen Metall, die ſich nicht, wie bei der Galvanoplaſtik, von der Unterlage ablöſen läßt, ſondern feſt an dieſer haftet. Die Galvanoſtegie dient alſo zum Vergolden, Verſilbern, Vernickeln u. ſ. w. Durch Fig. 282 wird ein Verfahren der Verſilberung veranſchaulicht, bei dem der Verſilberungsprozeß unterbrochen werden kann, ſobald ſich auf den betreffenden Gegenſtänden eine hinreichend dicke Silberſchicht abgeſetzt hat. Derartige Verſilberungswagen ſind gewöhnlich mit einer Vorrichtung verſehen, durch welche

Digitized by Google

der Strom automatisch unterbrochen wird, wenn eine Silberschicht von bestimmtem Gewicht ausgeschieden ist.

§ 358. Die Elektrolyse findet in der chemischen Technik und in der Metallurgie vielfache Anwendung. Elektrometallurgische Prozesse wurden bereits von dem französischen Physiker A. C. Becquerel (1788 bis 1878) benutzt, und in neuerer Zeit finden sie namentlich bei der Gewinnung und Reinigung des Kupfers Verwendung. Auch die Elektrolyse auf trockenem Wege, die zuerst Davy bei der Darstellung von Kalium und Natrium ausführte, findet heute wichtige Anwendungen. Sie wird in einem elektrischen Ofen

Fig. 283.



Elektrischer Ofen.

ausgeführt. In Fig. 283 ist der Heroultsche Ofen abgebildet, der zur Gewinnung von Aluminium dient. Er besteht aus einem eisernen Kasten, der mit Kohle ausgefüttert ist. Der negative Pol einer Stromquelle (Dynamomaschine) steht mit dem Kasten, der positive Pol mit einem Bündel von Kohlenstäben in Verbindung, das mehr oder weniger tief in den Kasten herabgelassen werden kann. Um den Ofen in Betrieb zu setzen, schmilzt man zunächst etwas Kupfer in demselben. Dann trägt man Kryolith, ein leicht schmelzbares Aluminiummineral, und dann Aluminiumoxyd ein. Das geschmolzene Oxyd wird durch den elektrischen Strom in der Weise zerlegt, daß sich das Metall auf dem Boden des Ofens ansammelt und der Sauerstoff die den positiven Pol bildenden Kohlenstäbe verbrennt. Von chemischen Ver-

Digitized by Google

bindungen, die man im elektrischen Ofen erzeugt, mag das Calciumkarbid genannt werden. Man stellt es durch Erhitzen eines Gemisches von Kalk (Calciumoxyd) und Kohle dar. Die Kohle vereinigt sich mit dem Sauerstoff des Kalks zu Kohlensäure und mit dem Calcium zu Calciumkarbid:

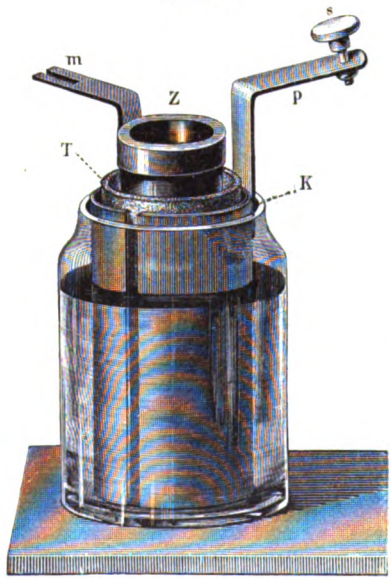
$$2\,CaO + 5\,C = CO_2 + 2\,CaC_2.$$

Wenn das Calciumkarbid mit Wasser in Berührung kommt, so wird es unter Bildung von Calciumhydroxyd und Acetylen zersetzt:

$$CaC_2 + 2\,H_2O = C_2H_2 + CaH_2O_2.$$

§ 359. Wie früher erwähnt wurde (§ 319), ist der Strom eines Voltaschen Elementes (Kupfer und Zink in verdünnte Schwefelsäure eingetaucht) nicht konstant, sondern der Strom nimmt infolge der Polarisation der Platten sehr schnell ab. In welcher Weise sich dieser Mangel beseitigen läßt, ist jetzt leicht zu verstehen.

Fig. 284.



Daniellsches Element.

Wenn man die beiden Pole eines Elementes durch einen Draht verbindet, so geht der Strom nicht nur durch diesen Draht, sondern auch durch die Flüssigkeit des Elementes, und zwar vom Zink zum Kupfer. Infolgedessen findet im Element eine Elektrolyse statt. Im Voltaschen Element wird das Wasser zerlegt. Der Wasserstoff scheidet sich am Kupfer ab. Wenn daher der Strom des Elementes in Tätigkeit ist, so überzieht sich die Kupferplatte mit einer Schicht Wasserstoff. Die Kupferplatte verwandelt sich gewissermaßen in eine Wasserstoffplatte. Dies hat aber eine erhebliche Verminderung der elektromotorischen Kraft des Elementes zur Folge. Der Sauerstoff, welcher sich an der Zinkplatte abscheidet, übt keinen schädlichen Einfluß aus, weil er sich nicht im freien Zustande abscheidet, sondern eine Bildung von Zinkoxyd bewirkt, welches von der Schwefelsäure, die dem Wasser zugesetzt wird, aufgelöst wird.

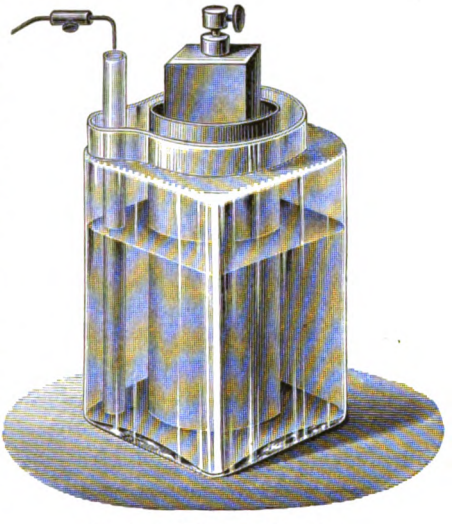
Das älteste konstante Element ist das Daniellsche (Fig. 284). Es wurde von J. F. Daniell (1790 bis 1845), Professor der Chemie am Kings College in London, konstruiert und besteht aus einer Kupferplatte und einer Zinkplatte, von denen die erstere in einer gesättigten Lösung von Kupfersulfat (Kupfervitriol), die letztere in verdünnter Schwefelsäure steht. Bei dem in der Figur abgebildeten Element steht die zylindrisch gebogene Kupferplatte *K*

Digitized by Google

im Glasbecher, die Zinkplatte *Z* in der porösen Tonzelle *T*. Damit das Zink nicht von der verdünnten Schwefelsäure angegriffen wird, während kein Strom durch das Element geht, wird es mit Quecksilber überzogen (amalgamiert). In diesem Element findet nicht, wie in dem Voltaschen, eine Zerlegung des Wassers, sondern eine Zerlegung des Kupfersulfats, $CuSO_4$, statt. Das Kupfer scheidet sich an der Kupferplatte ab und der Schwefelsäurerest am Zink, wo er die Bildung von Zinksulfat bewirkt.

Das Daniellsche Element ist sehr haltbar. Das Amalgamieren des Zinks wurde bereits 1828 von W. Sturgeon eingeführt. Daniell hatte ursprünglich eine tierische Membran benutzt, um die beiden Flüssigkeiten des Elementes voneinander zu scheiden, er wurde aber von einem Kaufmann Gassiot in London darauf aufmerksam gemacht, daß Becquerel statt der tierischen Membran poröse Tonzylinder benutze. Dieselben sind später bei allen konstanten Elementen in Gebrauch gekommen.

Fig. 285.



Leclanchésches Element.

Ein zweites konstantes Element wurde 1839 von Prof. W. R. Grove (1811 bis 1896) in London konstruiert. Er ersetzte das in Kupfervitriollösung eingetauchte Kupfer des Daniellschen Elementes durch Platin, welches in Salpetersäure eingetaucht wurde. Das Element ist kräftiger, allerdings auch bedeutend kostspieliger als das Daniellsche. Im folgenden Jahre wurde von Cooper und später von R. W. Bunsen (I, § 442) darauf hingewiesen, daß das Platin durch Retortenkohle ersetzt werden kann, ohne daß das Element erheblich an Kraft verliert. Ein solches sogenanntes Bunsensches Element besteht also aus Zink in verdünnter Schwefelsäure und Kohle in starker Salpetersäure. Wenn das Element in Tätigkeit ist, so scheidet sich am Zink Sauerstoff und an der Kohle Wasserstoff ab. Der erstere bewirkt, ebenso wie in den anderen Elementen, die Bildung von Zinksulfat, und der letztere wird von der Salpetersäure zu Wasser oxydiert. Von den zahlreichen anderen Elementen, die im Laufe der Zeit konstruiert worden sind, mag nur noch das in der Telegraphie vielfach benutzte Leclanchésche (Fig. 285) erwähnt werden. Es besteht aus einem Zinkstabe, der in eine gesättigte Lösung von Salmiak ($AmCl$) eingetaucht ist, und einem Kohlenstabe, der aber nicht von einer Flüssigkeit, sondern von gepulvertem Braunstein (MnO_2) umgeben ist. Wenn das Element in Tätigkeit ist, so entwickelt sich am Zink Chlor, was die Bildung von Zinkchlorid zur Folge hat. Die Gruppe NH_4

Digitized by Google

zerfällt in NH_3, Ammoniak, und H, Wasserstoff. Das erstere entweicht in die Luft und der letztere wird von Braunstein zu Wasser oxydiert. Das Leclanchésche Element ist nicht sehr stark, aber es hat den Vorzug, daß es sich lange unverändert hält. In neuerer Zeit werden häufig die sogenannten Trockenelemente verwendet, in denen die Flüssigkeit von geeigneten „Füllmassen", z. B. Gips, Kreide, Ton u. dergl., aufgesaugt ist, in die das Zink und die Kohle eingepackt sind.

Der Leser wird in diesem Abschnitt eine Definition der Stärke des Elementes vermißt haben. Dieselbe wird im folgenden Abschnitt gegeben werden, in welchem auch die sekundären Elemente oder Akkumulatoren Erwähnung finden werden.

Elektromagnetismus.

§ 360. „Die ganze Natur ist trotz aller Mannigfaltigkeit eine Einheit, dieselben Kräfte wirken überall, in der lebenden und in der leblosen Natur; die Verschiedenheiten bezeichnen nur ungleiche Entwickelungsstufen." Dies ist, mit wenigen Worten gesagt, der Kern der Schellingschen Naturphilosophie, die am Anfang des 19. Jahrhunderts auf die gebildete Gesellschaft in Deutschland und den nordischen Ländern einen großen Einfluß ausübte.

Schelling war ausschließlich Philosoph und war auf rein philosophischem Wege zu seiner Naturanschauung gekommen. Es ist bemerkenswert, am Anfang des 20. Jahrhunderts zu sehen, wie glücklich gegriffen diese Grundgedanken seiner Naturphilosophie waren. Die Lehre von der Einheit in der scheinbaren Vielheit der Naturkräfte bildet jetzt, auf Erfahrung, Beobachtung und Versuche gestützt, den Wegweiser für die physikalische Forschung, und auch für das Studium der lebenden Natur ist die Entwickelungslehre zu einer fruchtbaren wissenschaftlichen Hypothese geworden.

Die Schellingsche Naturphilosophie mußte bei den Physikern den Wunsch erwecken, den Zusammenhang der Naturkräfte durch Versuche nachzuweisen. Die Männer, welche auf dem Gebiete der Naturphilosophie tätig waren, waren auf dem Gebiete der Physik nur Dilettanten. Ihre Behauptungen waren daher in vielen Fällen unhaltbar, und es ist manches absprechende Urteil über die Naturphilosophie gefällt worden, in vielen Fällen mit vollem Recht. Aber jedenfalls hat die Naturphilosophie die Zeit vorbereitet, die die Forschung von neuem aufzunehmen und den Beweis für die Einheit und die Entwickelung in der Natur zu erbringen befähigt war.

Auf die Bestrebungen, die Einheit der Naturkräfte zu erkennen, hat wohl

Digitized by Google

kaum irgend etwas einen größeren Einfluß ausgeübt als die Entdeckung des Zusammenhanges zwischen Elektrizität und Magnetismus. Die Naturphilosophen hatten längst prophezeit, daß ein solcher Zusammenhang entdeckt werden würde. Allein als die Entdeckung wirklich gemacht wurde (1820), wirkte sie mit der ganzen Kraft des Neuen, denn niemand hatte erwartet, daß der Zusammenhang ein solcher sei, wie es sich herausstellte. — Hans Christian Oersted stand unter dem Einfluß der Naturphilosophie, allein er war sich von Jugend auf darüber klar gewesen, daß in der Naturforschung der Versuch und die Beobachtung das entscheidende sind und nicht die Spekulation. Er hatte bereits 1812 die Überzeugung ausgesprochen, daß Elektrizität und Magnetismus nahe miteinander verwandt seien, und er kam in den folgenden Jahren immer wieder auf diesen Gedanken zurück, wenn er seine Vorlesungen über Elektrizität vorbereitete. Als Stütze für seine Vermutung konnte er die bekannte Tatsache geltend machen, daß der Blitz auf die Magnetnadel wirkt. Teils wurden die Nadeln unruhig, wenn der Blitz in der Nähe einschlug, teils wurden sie sogar ummagnetisiert.

Fig. 286.

Die Magnetnadel, mit der Oersted den Elektromagnetismus entdeckte.

§ 361. Am 21. Juli 1820 versandte Oersted ein lateinisches Zirkular über seine Entdeckung. Da dieses Aktenstück den Ausgangspunkt für eine neue Periode der Naturforschung bildet, nämlich derjenigen Periode, in welcher der Beweis für die Einheit der Naturkräfte erbracht wurde, soll es hier vollständig mitgeteilt werden, und zwar in der Übersetzung von Gilbert, die in Gilberts Annalen, Band 66, veröffentlicht wurde.

Versuche über die Wirkung des elektrischen Konflikts auf die Magnetnadel.

Von **H. Chr. Oersted**, Professor der Physik zu Kopenhagen.

Die ersten Versuche über den Gegenstand, den ich aufzuklären unternehme, sind in den Vorlesungen angestellt worden, welche ich in dem verflossenen Winter über Elektrizität, Galvanismus und Magnetismus gehalten habe. Aus diesen Versuchen schien zu erhellen, daß die Magnetnadel sich mittels des galvanischen Apparates aus ihrer Lage bringen lasse, und zwar bei geschlossenem galvanischem Kreise, und nicht bei offenem, wie vor mehreren Jahren einige berühmte Physiker umsonst es versucht haben. Da aber diese Versuche mit einem weniger kräftigen Apparate angestellt waren, und daher die erhaltenen Erscheinungen nicht auszureichen schienen

Digitized by Google

für die Wichtigkeit der Sache, so nahm ich meinen Freund, den Justizrat Esmarch, zu Hilfe, um mit ihm die Versuche mittels eines großen, von uns gemeinschaftlich eingerichteten galvanischen Apparates zu wiederholen und zu versuchen. Auch der Regierungspräsident Bleugel war bei unseren Versuchen gegenwärtig als Teilnehmer und Zeuge. Überdem waren Zeugen derselben der als vortrefflicher Physiker längst bekannte Oberhofmarschall Hauch, der Professor der Naturgeschichte Reinhard, der Professor der Medizin Jacobson, ein vorzüglicher Experimentator und Kenner der Chemie, und der Dr. phil. Zeise. Auch habe ich öfters allein experimentiert, immer aber wenn ich dabei neue Erscheinungen fand, sie in Gegenwart dieser versammelten Gelehrten wiederholt.

In der Erzählung von unseren Versuchen übergehe ich alle, welche zwar zu der Erfindung geführt haben, nachdem die Sache aber einmal gefunden ist, nichts zur Erläuterung derselben beitragen, und schränke mich auf diejenigen ein, aus welchen die Natur des Gegenstandes deutlich hervorgeht.

Der galvanische Apparat, dessen wir uns bedient haben, besteht aus 20 rechteckigen kupfernen Zellen, die jede 12 Zoll lang, 12 Zoll hoch und $2^1/_2$ Zoll breit, und jede mit zwei Kupferstreifen versehen ist, welche so geneigt sind, daß sie den Kupferstab tragen können, der die in der Flüssigkeit der benachbarten Zelle schwebende Zinkplatte hält. Das Wasser, womit die Zellen angefüllt wurden, war mit $^1/_{60}$ seines Gewichtes Schwefelsäure und mit ebensoviel Salpetersäure versetzt, und der in jeder Zelle eingetauchte Teil der Zinkplatte war ein Quadrat von 10 Zoll Seite. Doch können auch kleinere Apparate gebraucht werden, wenn sie nur einen Draht zum Glühen zu bringen vermögen.

Man denke sich die beiden entgegengesetzten Enden des galvanischen Apparates durch einen Metalldraht verbunden. Diesen werde ich der Kürze halber stets den verbindenden Leiter oder den verbindenden Draht nennen; die Wirkung aber, welche in diesem verbindenden Leiter und um denselben her vor sich geht, mit dem Namen elektrischer Konflikt bezeichnen.

1. Man bringe ein geradliniges Stück dieses verbindenden Drahtes in horizontaler Lage über eine gewöhnliche, frei sich bewegende Magnetnadel so, daß er ihr parallel sei, und zu dem Ende kann man den Draht ohne Schaden nach Belieben biegen. Ist alles so eingerichtet, so wird die Magnetnadel in Bewegung kommen, und zwar so, daß sie unter dem vom negativen Ende des galvanischen Apparates herkommenden Teile des verbindenden Drahtes nach Westen zu weicht. Ist die Entfernung des Drahtes von der Magnetnadel nicht mehr als $^3/_4$ Zoll, so beträgt diese Abweichung ungefähr 45°. Bei größerer Entfernung nehmen die Abweichungswinkel ab, wie die Entfernungen zunehmen. Übrigens ist die Abweichung verschieden, nach Verschiedenheit der Stärke des Apparates.

Der verbindende Draht kann nach Osten oder nach Westen bewegt werden, wenn er nur immer der Nadel parallel bleibt, ohne daß dieses einen anderen Einfluß auf den Erfolg hat, als daß die Abweichung kleiner wird. Es läßt sich folglich diese Wirkung keineswegs einer Anziehung zuschreiben; denn derselbe Pol der Magnetnadel, der sich nach dem verbindenden Draht zu dreht, wenn er östlich von der Nadel ist, dreht sich von demselben abwärts, wenn er sich westlich von derselben befindet, welches nicht möglich wäre, wenn diese Abweichungen auf Anziehungen und Abstoßungen beruhten.

2. Der verbindende Leiter kann aus mehreren vereinigten Drähten oder Metallstreifen bestehen. Die Natur des Metalles verändert den Erfolg nicht, es sei denn vielleicht in Hinsicht der Größe. Wir haben Drähte aus Platin, Gold, Silber, Messing und Eisen, ferner Zinn- und Bleistreifen und Quecksilber mit gleichem Erfolg gebraucht. Wird der Leiter durch Wasser unterbrochen, so bleibt nicht alle Wirkung aus, es sei denn, die Wasserstrecke sei mehrere Zoll lang.

Digitized by Google

3. Der verbindende Draht wirkt auf die Magnetnadel durch Glas, durch Metalle, durch Holz, durch Wasser, durch Harz, durch töpferne Gefäße und durch Steine hindurch; denn als wir zwischen beide eine Glastafel oder eine Metallplatte oder ein Brett gebracht hatten, blieb der Erfolg nicht aus, ja selbst alle drei vereinigt, schienen die Wirkung kaum zu schwächen. Ebensowenig ein Elektrophor, eine Porphyrplatte und ein irdenes Gefäß, selbst nicht, wenn es voll Wasser war. Unsere Versuche haben auch gezeigt, daß die erwähnten Wirkungen nicht verändert werden, wenn man eine Magnetnadel nimmt, die sich in einer messingenen, voll Wasser gegossenen Büchse eingeschlossen befindet. Daß der Wirkungen Durchgang durch alle diese Materien, bei Elektrizität und Magnetismus bisher noch nie ist beobachtet worden, brauche ich kaum zu bemerken. Die Wirkungen, welche in dem elektrischen Konflikte stattfinden, sind also von den Wirkungen der einen oder der anderen elektrischen Kraft gänzlich verschieden.

4. Wenn sich der verbindende Draht in einer horizontalen Ebene unter der Magnetnadel befindet, so gehen alle angegebenen Wirkungen nach entgegengesetzter Richtung vor, als wenn er in einer über derselben befindlichen horizontalen Ebene ist, sonst aber auf ganz gleiche Weise. Der Pol der Magnetnadel, unter welchem sich derjenige Teil des verbindenden Drahtes befindet, in welchen die Elektrizität des negativen Endes des galvanischen Apparates zunächst hineintritt, weicht jetzt nach Osten ab.

Damit man dieses leichter im Gedächtnisse behalte, bedient man sich folgender Formel: Der Pol, über welchem die negative Elektrizität eintritt, wird nach Westen, der Pol, unter welchem sie eintritt, nach Osten zu gedreht.

5. Dreht man den verbindenden Draht in der horizontalen Ebene, so daß er allmählich immer größere Winkel mit dem magnetischen Meridian macht, so wird die Abweichung der Magnetnadel vermehrt, wenn das Drehen des Drahtes nach dem Orte der gestörten Magnetnadel zuwärts geschieht; sie nimmt dagegen ab, wenn das Drehen von diesem Orte zurück geschieht.

6. Ein verbindender Draht, der sich in der horizontalen Ebene befindet, in welcher sich eine durch ein Gegengewicht äquilibrierte Magnetnadel bewegt, und der Nadel parallel ist, bringt sie weder nach Osten noch nach Westen hin zum Weichen, sondern macht sie bloß in der Ebene der Inklination schwanken, so daß der Pol, nahe bei welchem in dem Draht die negative elektrische Kraft herkommt, heruntergedrückt wird, wenn der Draht sich an der westlichen, dagegen heraufgedrückt wird, wenn er sich an der östlichen Seite derselben befindet.

7. Wird der verbindende Draht senkrecht auf die Ebene des magnetischen Meridians über oder unter der Nadel gestellt, so bleibt diese in Ruhe, ausgenommen wenn der Draht dem Pole ziemlich nahe ist. Dann aber wird der Pol gehoben, wenn der Eintritt von der westlichen Seite des Drahtes her geschieht, und heruntergedrückt, wenn er von der östlichen Seite her vor sich geht.

8. Wird der verbindende Draht lotrecht nahe bei einem Pole der Magnetnadel ihm gegenübergestellt, und das obere Ende des Drahtes erhält die Elektrizität von dem negativen Ende des galvanischen Apparates, so bewegt sich dieser Pol nach Osten; befindet sich dagegen der Draht nahe bei einem Punkte in der Nadel, der zwischen dem Pole und dem Mittelpunkte der Nadel liegt, so wird sie nach Westen getrieben. Erhält das obere Ende des Drahtes die Elektrizität von dem positiven Ende, so gehen die entgegengesetzten Erscheinungen vor.

9. Biegt man den verbindenden Draht so, daß er an beiden Teilen der Biegung parallel wird, oder zwei parallele Schenkel bildet, so werden von ihm die magnetischen Pole nach Verschiedenheit der Umstände angezogen oder abgestoßen. Man stelle den Draht einem der beiden Pole der Nadel gegenüber, so daß die

Digitized by Google

Ebene der parallelen Schenkel auf dem magnetischen Meridian senkrecht sei, und verbinde den östlichen Schenkel mit dem negativen, den westlichen mit dem positiven Ende des galvanischen Apparates; in dieser Lage wird der nächste Pol zurückgestoßen, entweder nach Osten oder nach Westen, wie die Lage der Ebene der Schenkel es mit sich bringt. Ist der östliche Schenkel mit dem positiven, der westliche mit dem negativen Ende verbunden, so wird der nächste Pol angezogen. Wird die Ebene der Schenkel senkrecht bei einer Stelle zwischen dem Pol und dem Mittelpunkt der Nadel gebracht, so erfolgen dieselben Wirkungen, nur umgekehrt.

10. Eine Nadel aus Messing, welche nach Art der Magnetnadeln aufgehängt ist, kommt nicht in Bewegung durch die Wirkung des verbindenden Drahtes. Auch eine Nadel aus Glas oder aus Gummilack bleibt bei ähnlichen Versuchen mit ihr in Ruhe.

Aus allem diesem lassen sich einige Momente zur Erklärung dieser Erscheinungen ableiten. Der elektrische Konflikt vermag nur auf die magnetischen Teile der Materie zu wirken. Alle nicht magnetischen Körper scheinen für den elektrischen Konflikt durchgängig zu sein, die magnetischen Körper dagegen, oder vielmehr ihre magnetischen Teilchen, dem Hindurchgehen dieses Konfliktes zu widerstehen, und daher kommt es, daß sie durch den Stoß der kämpfenden Kräfte in Bewegung gesetzt werden können.

Daß der elektrische Konflikt nicht in dem leitenden Drahte eingeschlossen, sondern, wie gesagt, zugleich in dem umgebenden Raume ziemlich weithin verbreitet ist, ergibt sich aus den angeführten Beobachtungen hinlänglich.

Es läßt sich auch aus dem, was beobachtet worden, schließen, daß dieser Konflikt in Kreisen fortgehe; denn es scheint ohne diese Annahme nicht zu begreifen zu sein, wie derselbe Teil des verbindenden Drahtes, der unter einen Pol der Magnetnadel gestellt, diese nach Osten treibt, sie nach Westen bewegen sollte, wenn er sich über diesem Pol befindet; eine Kreisbewegung geht aber in den beiden entgegengesetzten Enden eines Durchmessers nach entgegengesetzten Richtungen vor sich. Es scheint überdem, es müsse die Kreisbewegung, verbunden mit der fortschreitenden Bewegung nach der Länge des Leiters, eine Schneckenlinie oder Spirale beschreiben, welches jedoch, wenn ich nicht irre, zur Erklärung der bisher beobachteten Erscheinungen nichts beiträgt.

Alle hier angegebenen Wirkungen auf den Nordpol der Nadel lassen sich leicht verstehen, wenn man annimmt, daß die negative elektrische Kraft oder Materie eine rechts gewundene Spirale durchläuft und den Nordpol fortstößt, auf den Südpol aber nicht wirkt; und ebenso alle Wirkungen auf den Südpol, wenn man der positiv elektrischen Kraft oder Materie eine Bewegung in entgegengesetzter Richtung, und das Vermögen auf den Südpol und nicht auf den Nordpol der Nadel zu wirken, zuschreibt. Von der Übereinstimmung dieses Gesetzes mit der Natur überzeugt man sich besser durch Wiederholen der Versuche, als durch eine lange Erklärung. Die Beurteilung der Versuche würde aber durch Figuren sehr erleichtert werden, welche den Weg, den die elektrischen Kräfte in dem verbindenden Drahte gehen, zeigen.

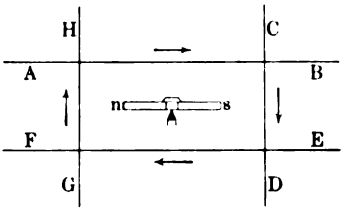
Ich füge dem Gesagten nur noch hinzu, daß ich in einem schon vor vielen Jahren herausgekommenen Werke bewiesen habe, daß die Wärme und das Licht der elektrische Konflikt sind. Aus den neuen hinzugekommenen Beobachtungen läßt sich schließen, daß die Bewegung in Kreisen auch in diesen Wirkungen vorkomme; welches zur Aufklärung derjenigen Tatsachen, die man die Polarität des Lichtes nennt, wie ich glaube, viel beitragen kann.

Geschrieben zu Kopenhagen, den 21. Juli 1820.

Digitized by Google

Hiermit hatte Oersted die Einwirkung des elektrischen Konflikts oder, wie wir sagen, des elektrischen Stromes auf die Magnetnadel aufgeklärt. Mit Hilfe von Fig. 287 sind die Ergebnisse von Oersteds Versuchen leicht zu übersehen. Die Magnetnadel *n s* kann sich in einer horizontalen Ebene drehen. Wenn der Strom die durch Pfeile angedeutete Richtung hat, so bewirken die einzelnen Teile der Leitung eine Drehung der Nadel in demselben Sinne. C. Holten, ein Schüler Oersteds und dessen Nachfolger als Professor der Physik an der Universität in Kopenhagen, hat für die Ablenkung die folgende Regel gegeben: Hält man die rechte Hand in die Richtung des Stromes, und zwar so, daß man die Innenseite der Hand dem Nordpol der Magnetnadel zuwendet, so schlägt diese nach der Seite aus, wo sich der Daumen befindet. Nach Ampère denkt man sich eine menschliche Figur, die mit dem Strome schwimmt und die Nadel ansieht. Vom Standpunkte dieses „Schwimmers" aus gesehen wird dann der Nordpol nach links abgelenkt.

Fig. 287.

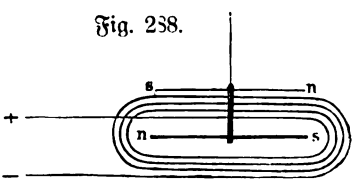


Oersteds Versuche.

Man suchte jetzt überall die Versuche Oersteds zu wiederholen. Dabei machte es Schwierigkeit, daß der Strom nach Oersteds Angabe so stark sein mußte, daß er den Leitungsdraht glühend macht. Professor Muncke in Heidelberg glaubte, um die Erscheinungen hervorzurufen, sei eine Voltasche Säule von 106 Plattenpaaren erforderlich, fand jedoch, daß ein einziges Plattenpaar hinreichend war. Professor de la Rive in Genf führte den Versuch einem größeren Kreise von Naturforschern vor, und nun ging es Schlag auf Schlag mit neuen Beobachtungen über den Elektromagnetismus.

Im September desselben Jahres legte J. S. C. Schweigger (1779 bis 1857) der naturwissenschaftlichen Gesellschaft in Halle einen Apparat vor, vermittelst dessen man sehr schwache Ströme nachweisen konnte. Der Herausgeber der berühmten „Annalen der Physik und Chemie", J. C. Poggendorff (1796 bis 1877), konstruierte selbständig denselben Apparat und gab ihm in der Hauptsache die Form, welche noch heute die allgemein gebräuchliche ist. Eine wesentliche Verbesserung erfuhr das Instrument 1825 durch Nobili, der die einfache Nadel durch die sogenannte astatische Doppelnadel ersetzte. Zwei Magnetnadeln *n s* und *s n* (Fig. 288) sind an einer gemeinsamen Achse (aus Messing) so befestigt, daß sie parallel sind, aber nach derselben Seite hin mit den entgegengesetzten Polen deuten. Wären die beiden Nadeln genau gleich stark, so würde der Erdmagnetismus auf die Doppelnadel keine drehende Wirkung ausüben. Wenn die eine Nadel dagegen stärker als die andere ist, so stellt sich die

Fig. 288.



Doppelnadel.

Digitized by Google

Doppelnadel in den magnetischen Meridian. Die Doppelnadel ist nun an einem Kokonfaden so aufgehängt, daß sich die eine Nadel außerhalb, die andere innerhalb einer Drahtwindung befindet. Wenn der Draht von einem Strom durchflossen wird, so wirkt dieser auf beide Nadeln in demselben Sinne ablenkend. Die oberen Teile der Windungen wirken allerdings auf die obere Nadel in entgegengesetztem Sinne wie die unteren Teile der Windungen. Diese beiden Wirkungen heben sich jedoch nicht auf, weil die erstere (infolge der geringeren Entfernung der Drähte) erheblich stärker ist als die letztere. Die ablenkende Wirkung des Stromes wird nun bei dem Apparate von Schweigger und Poggendorff dadurch bedeutend gesteigert, daß der Draht die Nadel nicht nur einmal, sondern vielmal umkreist. Der auf einer Holzspule aufgewundene Draht ist mit Seide umsponnen (isoliert), so daß der elektrische Strom nicht aus einer Windung in die andere direkt übergehen kann, sondern sämtliche Windungen der Reihe nach durchlaufen muß. Er wirkt dann in jeder einzelnen Windung auf die Nadel ablenkend. Wegen dieser vervielfältigenden Wirkung wird das Instrument Multiplikator genannt. Eine Abbildung desselben findet sich in Fig. 127 (S. 143). Das Instrument, durch welches sich sehr schwache Ströme nachweisen lassen, hat bei verschiedenen wichtigen Entdeckungen (thermoelektrische Ströme, Induktionsströme) ausgezeichnete Dienste geleistet.

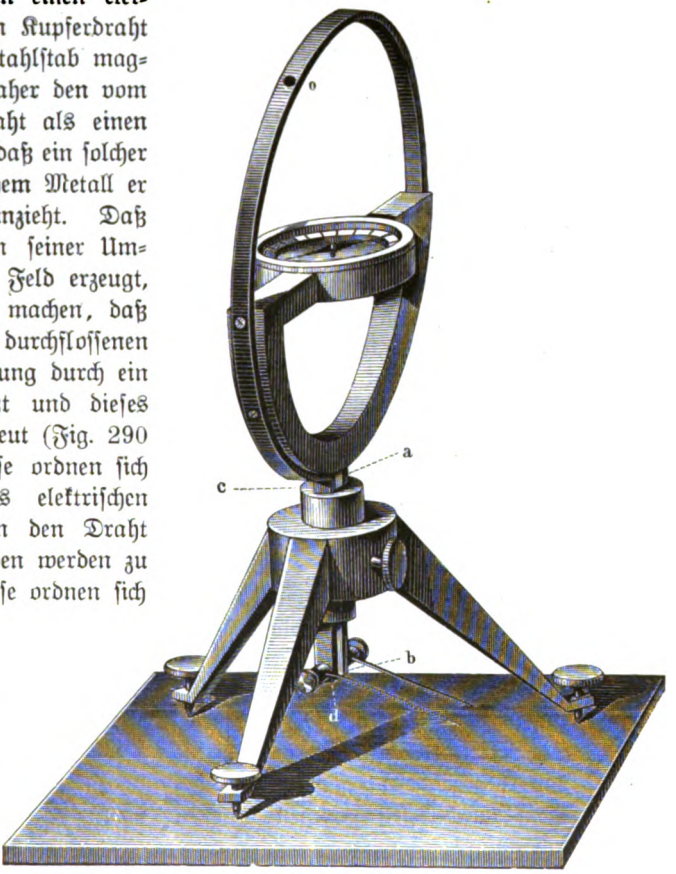
§ 362. Die Erfinder des Multiplikators verstanden diesen nicht als Meßapparat zu benutzen, weil sie das Gesetz nicht kannten, nach welchem der Strom auf einen Magnetpol wirkt. Die französischen Physiker Biot und Savart untersuchten im Herbst 1820 diese Wirkung und fanden, daß der Strom in jedem Teile des Leitungsdrahtes auf den Magnetpol mit einer Kraft wirkt, die dem Quadrat der Entfernung vom Magnetpol umgekehrt proportional ist. Der Stromstärke ist die magnetische Wirkung direkt proportional.

Zum Messen der Stromstärke dient die von Pouillet erfundene und von Weber verbesserte Tangentenbussole. Sie besteht im wesentlichen aus einem Kupferring, der in den Schließungsbogen des zu messenden Stromes eingeschaltet werden kann, und einer Deklinationsnadel, die sich in der Mitte des Kupferringes befindet (Fig. 289). Die Kreisteilung ist so angebracht, daß der Nullpunkt in die Ebene des Ringes fällt. Wenn das Instrument benutzt werden soll, stellt man es so auf, daß die Nadel auf den Nullpunkt der Teilung deutet, daß also der Ring im magnetischen Meridian steht. Je stärker der Strom ist, desto stärker wird die Nadel abgelenkt, und zwar ist die Stromstärke der Tangente des Ablenkungswinkels proportional. Der Leser, welcher mit den Grundbegriffen der Trigonometrie bekannt ist, wird sich hiervon leicht überzeugen, wenn er berücksichtigt, daß sich die Nadel in die Richtung der Resultierenden zweier Kräfte stellt, von denen die eine (die Kraft des Erdmagnetismus) in der Richtung des magnetischen Meridians, die andere (die ablenkende Kraft des Stromes) senkrecht auf diese Richtung wirkt.

Digitized by Google

§ 363. Im November 1820 teilte Arago (I, § 286) eine äußerst wichtige Beobachtung mit. Er hatte einen Kupferdraht um eine Glasröhre gewickelt und in diese einen Stahlstab geschoben. Wenn er nun einen elektrischen Strom durch den Kupferdraht gehen ließ, wurde der Stahlstab magnetisch. Er betrachtete daher den vom Strom durchflossenen Draht als einen Magneten, und er zeigte, daß ein solcher Draht, einerlei aus welchem Metall er besteht, Eisenfeilspäne anzieht. Daß ein elektrischer Strom in seiner Umgebung ein magnetisches Feld erzeugt, läßt sich dadurch sichtbar machen, daß man den vom Strom durchflossenen Draht in vertikaler Richtung durch ein Blatt Papier gehen läßt und dieses mit Eisenfeilspänen bestreut (Fig. 290 und 291 a. f. S.). Diese ordnen sich unter dem Einfluß des elektrischen Stromes in Kreisen um den Draht an. Sämtliche Eisenteilchen werden zu kleinen Magneten und diese ordnen sich so an, daß die Nordpole nach der durch die Pfeile angedeuteten Richtung deuten. Die Kreise, welche auf diese Weise entstehen, bezeichnen die Kraftlinien des magnetischen Feldes.

Fig. 289.



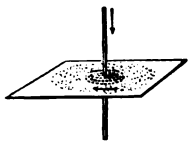
Tangentenbussole.

§ 364. Weiter aufgeklärt wurde der Zusammenhang zwischen Magnetismus und Elektrizität durch André Marie Ampère (geb. 1775 in Lyon, seit 1824 Professor der Physik am Collège de France, gest. 1836 in Marseille). Nachdem die Entdeckung Oersteds bekannt geworden war, nahm er sofort eine eingehende Untersuchung der neuen Erscheinungen in Angriff und machte alsbald die wichtige Entdeckung, daß die elektrischen Ströme eine mechanische Wirkung aufeinander ausüben. Ein sogenanntes Ampèresches Gestell, welches zur Beobachtung dieser Wirkungen dient, ist in Fig. 292 abgebildet. Der Strom tritt an der mit + bezeichneten Stelle ein und an der mit — bezeichneten Stelle aus. Bei y geht er aus dem festen Leiter v in das bewegliche Rechteck $abcd$ und bei x aus diesem in den festen Leiter t

Digitized by Google

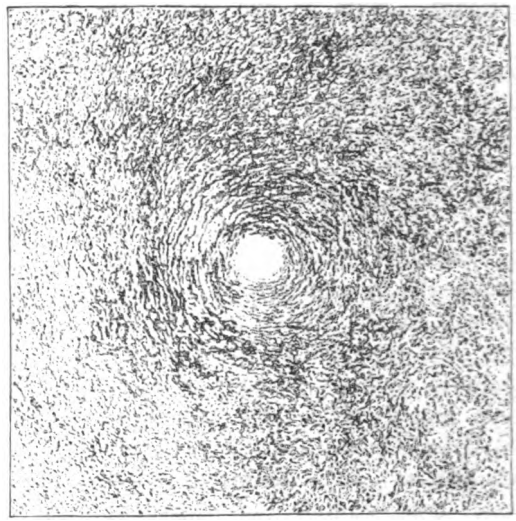
über. Die Enden des zu einem Rechteck gebogenen Drahtes sind mit Spitzen versehen, die in zwei Quecksilbernäpfchen eintauchen. Hierdurch ist das be-

Fig. 290.



Magnetisches Feld um einen Stromleiter.

Fig. 291.



Kraftlinien des magnetischen Feldes.

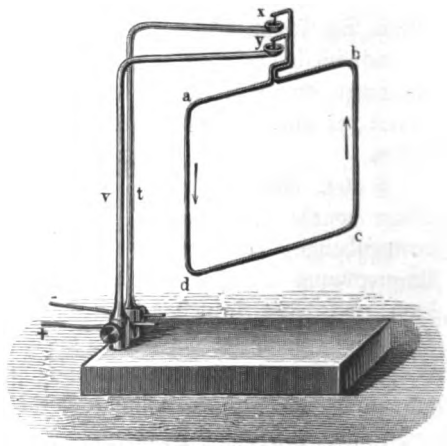
wegliche Rechteck mit den festen Leitern *v* und *t* verbunden, ohne daß es in seiner Bewegung gehindert ist. Die Richtung, in welcher das Rechteck vom Strom durchflossen wird, ist in der Figur durch Pfeile angedeutet. Ampère näherte nun dem von einem Strom durchflossenen Rechteck einen Leitungsdraht an, der ebenfalls von einem Strom durchflossen wurde, und beobachtete, daß die Ströme aufeinander einwirken, und zwar nach folgenden Regeln, welche die Grundlage der Elektrodynamik bilden.

a) Zwei parallele Seiten, die von gleich gerichteten Strömen durchflossen werden, ziehen sich an.

b) Zwei parallele Seiten, die von entgegengesetzt gerichteten Strömen durchflossen werden, stoßen sich ab.

c) Zwei Leiter, die nicht parallel sind, ziehen sich an, wenn in beiden der Strom nach dem Kreuzungspunkte hingeht oder von demselben herkommt. Sie stoßen sich dagegen ab, wenn der Strom in dem einen Leiter nach dem Kreuzungspunkte hingeht, in dem anderen dagegen von demselben herkommt.

Fig. 292.



Ampèresches Gestell.

Ampère leitete aus diesen Erscheinungen das Gesetz für die gegenseitige Einwirkung zweier elektrischer Ströme ab. **Dies Gesetz ermöglicht es,** die Wirkung zu berechnen, welche zwei beliebige Ströme aufeinander ausüben.

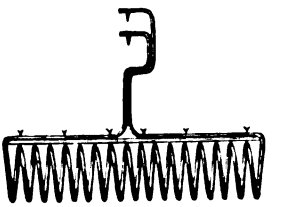
Digitized by Google

Seine Behandlung dieses wichtigen Gegenstandes war eine so gründliche und erschöpfende, daß man seitdem nichts wesentliches hinzuzufügen gehabt hat. Man hat seine vortreffliche Arbeit mit Recht dem Werke Newtons über die allgemeine Anziehung zur Seite gestellt.

Auf den beweglichen Stromleiter übte selbstverständlich auch der Magnet einen Einfluß aus. Wird ein Magnet in den beweglichen Leiter gebracht, so dreht sich entweder der Magnet oder der Leiter, je nachdem der eine beweglich ist und der andere festgehalten wird, bis die Ebene des Leiters auf der Achse des Magneten senkrecht steht, und zwar so, daß der Ampèresche „Schwimmer" den Nordpol des Magneten links hat.

Sodann ließ Ampère den elektrischen Strom durch einen spiralförmig gewundenen Draht, ein sogenanntes Solenoid, gehen (Fig. 293). Dies verhielt sich dann ganz wie ein Magnet, hatte einen Nordpol und einen Südpol und stellte sich in die Richtung des magnetischen Meridians. Da nämlich die Erde ein großer Magnet ist, dessen Achse dieselbe Richtung wie der magnetische Meridian hat, so müssen sich die Windungen des Solenoids, wenn sie von einem Strom durchflossen werden, senkrecht auf diese Richtung stellen.

Fig. 293.

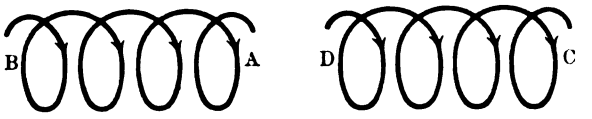


Solenoid.

Zwei Solenoide wirken genau in derselben Weise aufeinander ein wie zwei Magneten. Dies ergibt sich als eine einfache Folgerung aus dem Gesetze, nach welchem zwei von elektrischen Strömen durchflossene Leiter aufeinander einwirken.

Wenn nämlich die beiden Solenoide einander gegenübergestellt werden (Fig. 294), so stehen sich zwei kreisförmige Stromleiter gegenüber und die

Fig. 294.



Anziehung und Abstoßung der Solenoide.

Ströme sind entweder gleich gerichtet oder entgegengesetzt gerichtet. Im ersteren Falle ziehen sich die Stromleiter an, im letzteren Falle stoßen sie sich ab. Aus der Figur ist leicht zu ersehen, daß Anziehung zwischen den „entgegengesetzten" Polen und Abstoßung zwischen den „gleichartigen" Polen der Solenoide stattfindet (*A* und *D* sind entgegengesetzte, *A* und *C* gleichartige Pole).

Vertauscht man eines der beiden Solenoide mit einem Magneten, so bringt dieser dieselben Wirkungen hervor wie das Solenoid. Der Nordpol des Magneten zieht den einen Pol des Solenoids an und stößt den anderen ab, und der Südpol wirkt auf das Solenoid in entsprechender Weise. Zur Bestimmung des Nordpols des Solenoids gibt Ampère die folgende Regel:

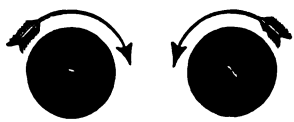
Digitized by Google

Der Nordpol des Solenoids wird vom Daumen angezeigt, wenn man die rechte Hand in die Richtung des Stromes hält und die Innenfläche der Hand der Achse des Solenoids zuwendet. *A* und *C* (Fig. 294) sind die Nordpole, *B* und *D* die Südpole.

§ 365. Ampère schlug vor, den Magnetismus gar nicht als eine besondere Naturkraft zu betrachten, da man jeden Magneten als Träger von kreisenden elektrischen Strömen betrachten könne. Um die Vorstellung von den Molekularmagneten aufrecht erhalten zu können, sollte man sich jedes Molekül eines Magneten von einem elektrischen Strom umkreist denken. Allein hier bietet sich sofort die wichtige Frage, ob die Molekularströme bereits im unmagnetischen Eisen vorhanden sind oder ob sie erst zustande kommen, wenn das Eisen magnetisiert wird. Ampère selbst hat sich über diese Frage nicht ausgesprochen, und auch später ist sie nicht beantwortet worden. Es hat nämlich seine großen Schwierigkeiten mit diesen ununterbrochen kreisenden Strömen, da ein elektrischer Strom stets Wärme erzeugt und nicht ohne Energieverbrauch in Gang gehalten werden kann. Ampère nahm an, daß die Molekularströme keinem Widerstande begegnen und infolgedessen weder Wärme erzeugen noch Energie verbrauchen. Wenn man von dieser Schwierigkeit absieht, lassen sich allerdings alle magnetischen Erscheinungen durch die Wirkung von Kreisströmen erklären. Zur Erklärung des Erdmagnetismus müßte man Ströme annehmen, die die Erde von Osten nach Westen umkreisen.

§ 366. Arago hatte durch seine Beobachtung, daß ein Stahlstab magnetisiert wird, wenn er von einem elektrischen Strom umkreist wird, den Elektromagneten erfunden. Die ersten größeren Elektromagneten wurden 1825 von Sturgeon konstruiert. Sie bestehen aus einem Stabe von weichem Eisen, der mit umsponnenem Kupferdraht umwickelt ist. Wenn der Draht von einem elektrischen Strom durchflossen wird, so wird der Eisenstab magnetisch. An welchem Ende des Stabes der Nordpol, und an welchem der Südpol entsteht, findet man entweder vermittelst der in § 264 gegebenen Regel oder auch vermittelst der folgenden, ebenfalls von Ampère stammenden Regel: Dasjenige Ende, welches, dem Beschauer zugewendet, vom Strom in der Richtung der Uhrzeigerbewegung umkreist wird, ist der Südpol (Fig. 295). Wenn der Strom unterbrochen wird, wird der Eisenstab sofort unmagnetisch. Ein Elektromagnet, und zwar ein Hufeisenmagnet, ist in Fig. 296 abgebildet. Im physikalischen Kabinet der polytechnischen Lehranstalt in Kopenhagen wird ein großer Elektromagnet aufbewahrt, den Oersted im Jahre 1847 konstruiert hat. Wenn die Drahtwindungen desselben von einem Strom von 8 Ampère durchflossen wurden, so wurde er so stark magnetisch, daß zum Abreißen des Ankers, der ein Gewicht von 32 Pfund hatte, ein Zug von 3000 Pfund erforderlich war.

Fig. 295.

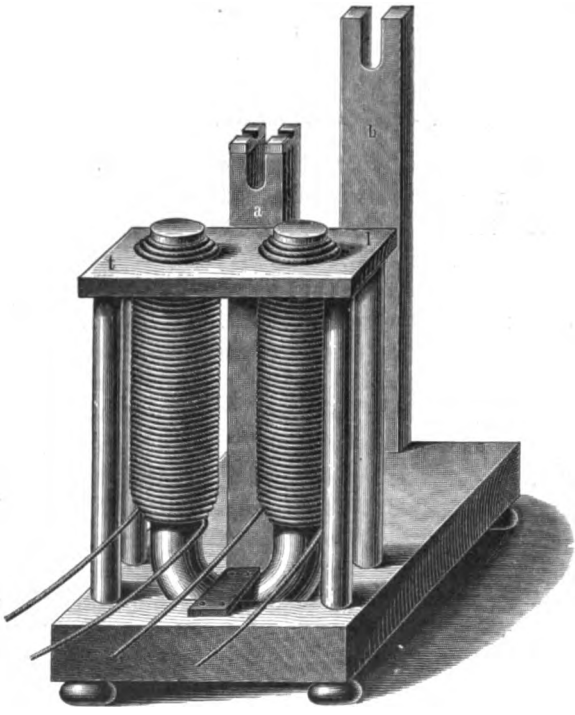


Pole des Elektromagneten.

Digitized by Google

Vermittelst eines Elektromagneten läßt sich ein starkes magnetisches Feld erzeugen, welches sich vorzüglich eignet, das magnetische Verhalten verschiedener Substanzen zu untersuchen. Derartige Untersuchungen wurden zuerst von Faraday ausgeführt, und er fand, daß der Magnetismus mehr oder weniger auf alle Körper einwirkt. Wird ein an einem Faden hängendes Eisenstäbchen zwischen die Pole eines Elektromagneten gehalten, so stellt es sich in die Verbindungslinie der Pole. An dem dem Nordpol zugewendeten Ende des Stäbchens entsteht bekanntlich ein Südpol und am anderen Ende ein Nordpol. Ebenso wie das Eisen, verhalten sich Nickel, Kobalt, Chrom, Mangan und Platin. Diese Metalle werden daher als magnetische bezeichnet. Die meisten Körper zeigen dagegen ein ganz anderes Verhalten. Wird z. B. ein Wismutstäbchen zwischen den Polen eines starken Hufeisenmagneten aufgehängt, so stellt er sich senkrecht zur Verbindungslinie der Pole. Wismut wird also von beiden Polen abgestoßen. Faraday nannte Substanzen, welche ein derartiges Verhalten zeigen, diamagnetische. Die Erscheinung selbst war schon früher beobachtet worden. Diamagnetische Metalle sind außer Wismut unter anderen Zink, Zinn, Natrium, Quecksilber, Blei, Silber, Kupfer und Gold. Auch die Metalloide sind diamagnetisch, namentlich Schwefel, Phosphor und Kohle. Die Lösungen der Salze magnetischer Metalle sind ebenfalls magnetisch, andere Flüssigkeiten in der Regel diamagnetisch. Durch Fig. 297 (a. f. S.) wird die Anziehung des Magnetpols auf eine Lösung von Eisenchlorid veranschaulicht. Faraday untersuchte auch das magnetische Verhalten von Gasen und fand, daß sie in der Regel diamagnetisch sind. Von den Gasen, die er untersuchte, war nur der Sauerstoff magnetisch.

Fig. 296.



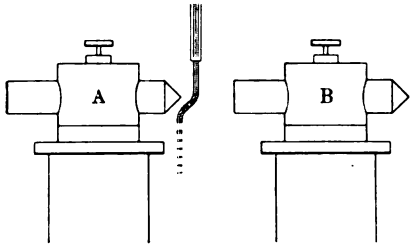
Elektromagnet.

§ 367. Der Elektromagnet hat die wertvolle Eigenschaft, daß er sehr stark gemacht werden kann. Außerdem hat er noch die ebenfalls sehr wert-

Digitized by Google

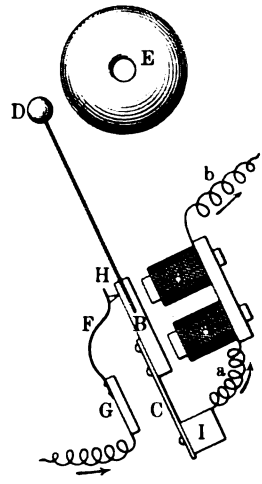
volle Eigenschaft, daß er durch Unterbrechen des Stromes augenblicklich unmagnetisch gemacht werden kann. Das Schließen und Öffnen des Stromes kann vermittelst einer Feder in rascher Folge automatisch bewirkt werden.

Fig. 297.



Magnetismus von Lösungen.

Fig. 298.



Elektrische Schelle.

Eine zu diesem Zwecke dienende Vorrichtung wird nach dem Erfinder, J. Ph. Wagner (1799 bis 1879) in Frankfurt, der Wagnersche Hammer genannt. Er bildet einen wesentlichen Teil einer elektrischen Schelle. *A A* (Fig. 298) ist der Elektromagnet. Der Strom eines galvanischen Elementes durchläuft den Apparat in der durch Pfeile angedeuteten Richtung. Sobald aber der Strom geschlossen ist, werden die Eisenkerne des Elektromagneten *A A* magnetisch und ziehen den Anker *B* an. Infolgedessen hört die Berührung zwischen der Metallspitze und *B* auf und der Strom ist unterbrochen. Weil aber dann der Elektromagnet nicht mehr wirkt, wird der Anker durch die Feder *C* zurückgezogen. Dann ist aber der Strom bei *H* wieder geschlossen, der Magnet zieht den Anker wieder an u. s. w. Die mit dem Anker verbundene Kugel *D* schwingt also hin und her und schlägt fortwährend an die Glocke *E*. Der Wagnersche Hammer spielt, wie wir sehen werden, eine wichtige Rolle bei den Induktionsapparaten.

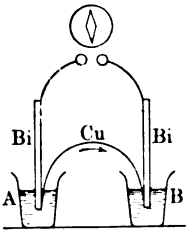
Thermoelektrizität.

§ 368. Der bereits mehrfach genannte deutsche Physiker Th. J. Seebeck (geb. 1770 in Reval, gest. 1831 in Berlin), ein Freund Oersteds, machte 1821 mit Hilfe des Multiplikators eine merkwürdige Entdeckung. Er legte eine Kupferscheibe und eine Antimonscheibe aufeinander und verband die Scheiben durch Kupferdrähte mit den Windungen eines Multiplikators.

Digitized by Google

Wenn er nun die Metallplatten mit der Hand aneinanderdrückte, so entstand ein elektrischer Strom. Wenn dagegen die Platten in anderer Weise, d. h. ohne daß sie mit der Hand berührt wurden, aneinandergedrückt wurden, so entstand kein Strom. Seebeck erkannte alsbald, daß es die Wärme der Hand war, die den elektrischen Strom hervorrief. Er fand, daß der Strom zustande kommt, wenn die Berührungsstellen verschiedener Metalle ungleiche Temperatur haben. Zur Beobachtung der Erscheinung konstruierte er den in Fig. 299 abgebildeten Apparat. Von den beiden Gefäßen *A* und *B* enthält das erstere kaltes und das letztere warmes Wasser. Die beiden Wismutstäbchen *Bi* sind durch den angelöteten Kupferdraht *Cu* verbunden. Die beiden Lötstellen haben verschiedene Temperatur, und es entsteht infolgedessen ein Strom in der durch einen Pfeil angedeuteten Richtung. An der wärmeren Lötstelle geht der Strom vom Kupfer zum Wismut. Der Strom wird durch einen Multiplikator angezeigt, dessen Windungen mit den Wismutstäbchen verbunden sind. Wenn die Temperaturen in *A* und *B* konstant gehalten werden, so bleibt auch die Stromstärke unverändert.

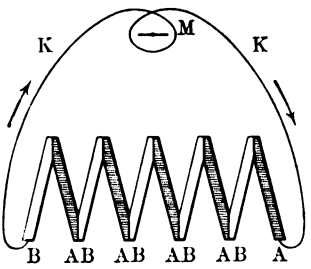
Fig. 299.



Elektrizität durch Wärme.

Wenn der Unterschied der Temperaturen in *A* und *B* nur gering ist, so ist die Stromstärke dem Temperaturunterschiede proportional. Für große Temperaturunterschiede, z. B. wenn die eine Lötstelle durch eine Flamme erhitzt wird, gilt jedoch diese Proportionalität nicht mehr. Bei manchen Metallen, z. B. Eisen und Kupfer, nimmt der Strom, von einer gewissen Temperatur an, ab und hört schließlich ganz auf. Wenn dann noch stärker erhitzt wird, so entsteht ein Strom in entgegengesetzter Richtung. Wenn man einen Eisendraht und einen Kupferdraht zusammenlötet, die eine Lötstelle auf 0° erhält und die andere erhitzt, so findet man, daß der Strom bei 275° C am stärksten ist und bei 550° aufhört. Bei Temperaturen über 550° geht er in umgekehrter Richtung.

Fig. 300.



Thermoelektrische Batterie.

Die thermoelektrische Wirkung ist bei verschiedenen Metallen verschieden. Am stärksten ist sie bei Wismut und Antimon. Wenn eine Anzahl von Antimonstäbchen (*A*) und Wismutstäbchen (*B*) zusammengelötet werden, so bilden sie eine thermoelektrische Batterie oder Säule (Thermosäule). Wenn z. B. die in Fig. 300 mit *A B* bezeichneten Lötstellen erwärmt werden, so geht der Strom an diesen Lötstellen vom Wismut zum Antimon. Die elektromotorische Kraft eines galvanischen Elementes wird durch einen chemischen Prozeß, die elektromotorische Kraft eines thermoelektrischen Elementes durch Wärme hervorgerufen.

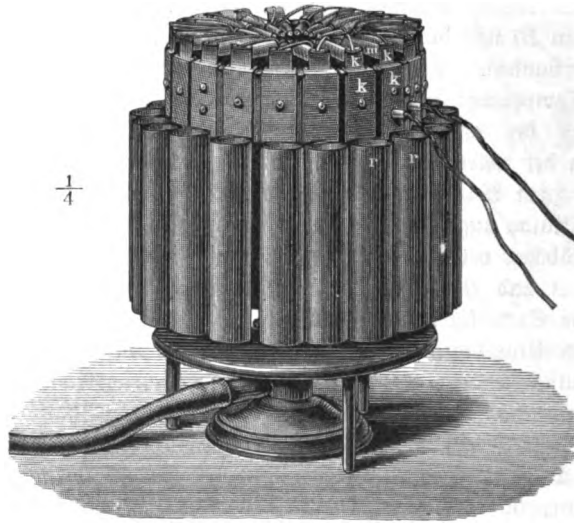
Digitized by Google

Über die Anwendung der Thermosäule ist bereits in den §§ 136, 137 und 149 berichtet worden.

Die elektromotorische Kraft eines thermoelektrischen Elementes ist übrigens gering. Es ist eine große Anzahl von Elementen (z. B. 40 Elemente aus Neusilber und Schwefelkupfer) erforderlich, um einen Strom zu erzeugen, durch den man Wasser zersetzen kann.

Thermosäulen zur Erzeugung stärkerer Ströme sind in neuerer Zeit von Clamond, Noë und Gülcher konstruiert worden. Die Elemente der Noë-

Fig. 301.



Noëssche Thermosäule.

schen Säule (Fig. 301) bestehen aus Neusilber und einer Legierung von Antimon und Zink. Eine Säule von 20 Elementen hat ungefähr die elektromotorische Kraft eines Bunsenschen Elementes.

Bei allen thermoelektrischen Elementen wird nur ein geringer Teil der zugeführten Wärme in Elektrizität verwandelt. Die durch Verbrennen von Kohle oder Gas erzeugte Wärme in großem Maßstabe billig in Elektrizität umzuwandeln, ist bis jetzt nicht gelungen.

Das Ohmsche Gesetz.

§ 369. Wie die Stärke des elektrischen Stromes gemessen wird, ist im Vorhergehenden auseinandergesetzt worden. Ein Strom ist aber keineswegs durch die Stärke allein hinlänglich charakterisiert. Die Stromstärke wird

Digitized by Google

nämlich in hohem Grade von dem Leiter beeinflußt, in welchem der Strom fließt. Dieser Leiter setzt dem Strom immer einen gewissen Widerstand entgegen. Eine Untersuchung dieser Verhältnisse war schon früher von verschiedenen Forschern, z. B. von H. Davy, in Angriff genommen worden, aber vollständig aufgeklärt wurden sie erst von Georg Simon Ohm.

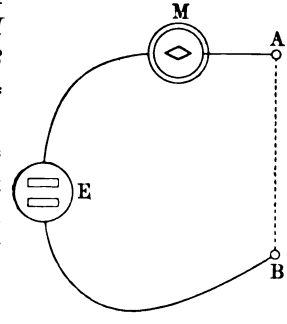
Fig. 302.

Georg Simon Ohm.

Ohm war 1787 in Erlangen als Sohn eines Schlossermeisters geboren. Er besuchte die Universität seiner Vaterstadt, an der er sich auch als Privatdozent habilitierte. Er gab jedoch alsbald die akademische Laufbahn wieder auf, um eine Lehrerstelle an der Realschule in Bamberg anzunehmen. Seit 1817 war er Oberlehrer am Gymnasium in Köln und seit 1826 Lehrer an der Kriegsschule in Berlin. Von 1833 bis 1841 war er Professor an der polytechnischen Schule in Nürnberg und von 1841 bis zu seinem Tode (1854) Professor der Physik an der Universität in München.

Die erste Abhandlung Ohms über den Leitungswiderstand der Metalle erschien 1826. Bei seinen ersten Versuchen verfuhr er in folgender Weise. Von einem galvanischen Element E (Fig. 303) gehen Kupferdrähte nach den Quecksilbernäpfen A und B. In den einen Draht ist der Multiplikator M eingeschaltet. Dann schaltete er zwischen A und B verschiedene Leiter ein und beobachtete am Multiplikator die Stromstärke.

Fig. 303.



Versuch von Ohm.

Auf diese Weise konnte er das Leitungsvermögen verschiedener Drähte vergleichen. Wenn der Draht ein schlechter Leiter war, so entstand ein schwacher Strom, wenn er dagegen ein guter Leiter war, so entstand ein starker Strom. Störend war bei diesen Versuchen der Umstand, daß das Element infolge der Polarisation (§ 320) nicht konstant wirkte. Er vertauschte daher auf den Rat Poggendorffs das galvanische Element mit einem thermoelektrischen Element aus Wismut und Kupfer. Der Temperaturunterschied der beiden Lötstellen wurde

Digitized by Google

dadurch konstant gehalten, daß die eine in Eiswasser, die andere in siedendes Wasser eingetaucht war.

§ 370. Als Einheit für die Widerstandsmessungen benutzte Ohm einen 4 Zoll langen und ziemlich dicken Kupferdraht. Wenn er diesen zwischen *A* und *B* einschaltete, so erhielt er einen Strom, der durch einen bestimmten Ausschlag der Nadel des Multiplikators angezeigt wurde. Wenn dann andere Drähte eingeschaltet wurden, so ergab sich aus dem Ausschlag der Nadel, um wieviel der Strom stärker oder schwächer geworden war, oder, mit anderen Worten, man konnte aus dem Ausschlag der Nadel ersehen, wieviel der eingeschaltete Draht besser oder schlechter leitete als der „Normalkupferdraht".

Es ist einerlei, ob man den verschiedenen Metallen ein verschiedenes Leitungsvermögen für den Strom zuschreibt oder einen verschiedenen Widerstand, den sie dem Strom entgegensetzen. Wenn man einen Draht, der in einen Stromkreis eingeschaltet ist, durch einen anderen ersetzt und der Strom sinkt infolgedessen auf die halbe Stärke, so hat der erste Draht das doppelte Leitungsvermögen oder der zweite den doppelten Widerstand.

Durch Messung des Leitungsvermögens hatte also Ohm zugleich den Widerstand gemessen. Aus diesen Messungen ergaben sich die folgenden allgemeinen Gesetze: 1. Der Widerstand ist der Länge des Drahtes direkt proportional. Von zwei Drähten aus demselben Metall und von demselben Querschnitt, von denen der eine fünfmal so lang wie der andere ist, leistet der längere dem Strom einen fünfmal so großen Widerstand wie der kürzere. 2. Der Widerstand ist dem Querschnitt umgekehrt proportional. Wenn daher der Querschnitt eines Drahtes in demselben Verhältnis wie die Länge zunimmt, so ist der Widerstand für alle Längen derselbe. Zwei Drähte aus demselben Metall, von denen der eine 20 m und der andere 100 m lang ist, haben denselben Widerstand, wenn der Querschnitt des ersten gleich 4 qmm und der Querschnitt des zweiten gleich 20 qmm ist.

Als Einheit des Leitungswiderstandes wurde von Jacobi (§ 357) der Widerstand eines Kupferdrahtes von 1 m Länge und 1 mm Durchmesser benutzt. Später kam die Siemenssche Einheit in Gebrauch. Sie ist der Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt. Heutzutage benutzt man als Widerstandseinheit das „Ohm", d. h. den Widerstand einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt (bei 0°).

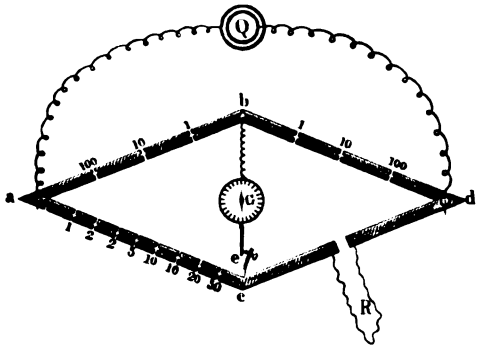
§ 371. Um den Widerstand eines Leiters zu messen, schaltet man den Leiter und eine Tangentenbussole in den Stromkreis eines konstanten Elementes ein und beobachtet die Ablenkung der Nadel. Dann entfernt man den Leiter und schaltet an seiner Stelle nach und nach soviel „Ohm" ein, bis die Nadel denselben Ausschlag zeigt.

Der Apparat, der in den meisten Fällen zum Messen von Widerständen benutzt wird, ist die Wheatstonesche Brücke. Die (schematische) Fig. 304 zeigt die Einrichtung der Brücke in Verbindung mit einem Siemensschen

Digitized by Google

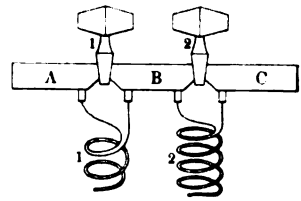
Stöpselrheostaten. Der Strom des Elementes Q verzweigt sich im Punkte a und geht zum Teil über b, zum Teil über c nach d. An den mit Zahlen bezeichneten Stellen der Figur können Widerstände von 1, 2, 5, 10, 20, 50 und 100 Ohm in den aus Messing bestehenden Leiter eingeschaltet werden.

Fig. 304.



Wheatstonesche Brücke.

Fig. 305.



Widerstandsspiralen.

R ist der Leiter, dessen Widerstand ermittelt werden soll. Wie das Ein- und Ausschalten der Widerstände bewirkt wird, ist aus Fig. 305 ersichtlich. Die Widerstände bestehen aus Drahtspiralen, die vom Strom durchlaufen werden müssen, wenn die einzelnen Teile A, B, C des Stromleiters nur durch diese Spiralen verbunden sind, d. h. wenn nicht durch Einsetzen der Stöpsel 1, 2 eine zweite, und zwar eine gut leitende (widerstandslose) Verbindung zwischen den einzelnen Metallstücken hergestellt wird. Das Einschalten der Widerstände wird also durch Ziehen der Stöpsel bewirkt.

Die Verbindung bc, in welche ein Galvanometer eingeschaltet ist, ist die eigentliche Brücke. Sie ist bei e unterbrochen und kann hier vermittelst eines Tasters geschlossen werden. Wenn nun die in ab und bd eingeschalteten Widerstände sich ebenso verhalten wie die in ac und cd eingeschalteten Widerstände, so geht kein Strom durch die Brücke. Wenn also die beiden ersteren Widerstände gleich sind, so sind auch die letzteren gleich, wenn kein Strom durch die Brücke und das in die Brücke eingeschaltete Galvanometer geht. Um den Widerstand des Leiters R zu ermitteln, hat man also weiter nichts zu tun, als in ab und bd zwei gleiche Widerstände einzuschalten und dann in ac durch Ziehen der Stöpsel soviel „Ohm“ einzuschalten, bis kein Strom durch die Brücke geht. Dann ist der Widerstand von R ebenso groß wie der durch Ziehen der Stöpsel in ac eingeschaltete Widerstand.

Der Widerstand eines Drahtes von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt, in Ohm ausgedrückt, ist der sogenannte Widerstandskoeffizient des betreffenden Metalles. Er ist für

Silber	0,016	Siliciumbronze	0,02
Reines Kupfer	0,016	Aluminium	0,03
Gewöhnliches Kupfer . .	0,025	Eisen	0,1

Digitized by Google

Platin	0,1	Neusilber	0,2
Zink	0,056	Quecksilber	0,95.
Blei	0,2		

§ 372. Bei den Untersuchungen über den Leitungswiderstand bot sich die Frage, in welchem Zusammenhange die elektromotorische Kraft der Elektrizitätsquelle, die Stärke des hervorgebrachten Stromes und der vom Strom zu überwindende Widerstand stehen. Die Elektrizitätsquelle, welche Ohm bei seinen Versuchen benutzte, bestand aus thermoelektrischen Elementen, die mit konstanter elektromotorischer Kraft wirken, wenn die Lötstellen auf unveränderter Temperatur gehalten werden, z. B. die eine auf 0° und die andere auf 100°. Die Stromstärke wurde aus der Ablenkung der Magnetnadel abgeleitet und der Widerstand durch Vergleichung mit dem „Normalwiderstand" ermittelt (vgl. § 370).

Aus den zahlreichen Versuchen, die Ohm ausführte, ergab sich, daß der Zusammenhang zwischen den drei genannten Größen ein äußerst einfacher ist. Wenn die elektromotorische Kraft konstant ist, so ist die Stromstärke dem Widerstande umgekehrt proportional. Wenn der Widerstand verdoppelt wird, so sinkt die Stromstärke auf die Hälfte u. s. w. Wenn die elektromotorische Kraft geändert wird, so ändert sich die Stromstärke in demselben Verhältnis. Das Ohmsche Gesetz lautet also vollständig: **Die Stromstärke ist der elektromotorischen Kraft direkt und dem Widerstande umgekehrt proportional**, oder auch: Das Maß für die elektromotorische Kraft ist das Produkt aus Stromstärke und Widerstand.

§ 373. Nachdem wir früher die Einheit des Widerstandes (Ohm) definiert haben, wollen wir nunmehr auch die Einheit der Stromstärke und die Einheit der elektromotorischen Kraft festsetzen.

Die Einheit der Stromstärke heißt ein Ampère. Ein Strom, der die Stärke 1 besitzt, entwickelt in einer Minute 7 (genau 6,96) ccm Wasserstoff oder 10,440 ccm Knallgas. Ein Strom von 10 Ampère ist also ein solcher, der in der Minute 70 ccm Knallgas entwickelt.

Die Einheit der elektromotorischen Kraft ergibt sich aus den Einheiten des Widerstandes und der Stromstärke vermittelst des Ohmschen Gesetzes. Sie ist die elektromotorische Kraft einer Elektrizitätsquelle, die in einem Stromkreise von 1 Ohm Widerstand einen Strom von der Stärke 1 Ampère erzeugt. Diese Einheit heißt ein Volt. Mit den Namen für die Einheiten der Stromstärke, des Widerstandes und der elektromotorischen Kraft läßt sich das Ohmsche Gesetz in folgender Weise ausdrücken:

$$\text{Ampère} = \frac{\text{Volt}}{\text{Ohm}}$$

oder

$$\text{Ampère} \times \text{Ohm} = \text{Volt}.$$

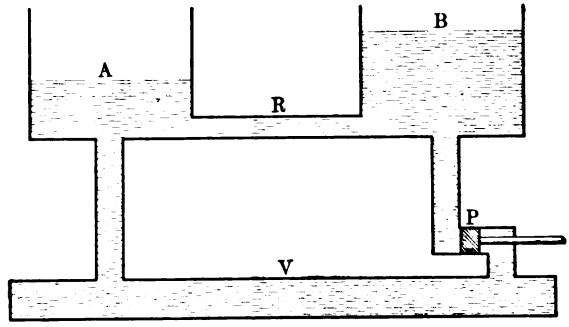
Die Namen Ampère, Ohm und Volt wurden 1881 auf dem internationalen Kongreß in Paris gewählt, um das Andenken von Ampère,

Digitized by Google

Ohm und Volta zu ehren. Ampère hatte ja besonders die Kraftwirkung des elektrischen Stromes untersucht, Ohm hatte sich vorzugsweise mit der Widerstandsmessung befaßt und Volta hatte seinerzeit die Bezeichnung „elektromotorische Kraft" eingeführt.

§ 374. Für einen vollständigen Kreislauf — von dem einen Pol des Elementes durch die Leitung nach dem anderen Pol und durch das Element zum ersten Pol — ist das Ohmsche Gesetz leicht zu veranschaulichen. Der Strom ist überall derselbe, und der Widerstand ist teils der innere (im Element), teils der äußere (in der Leitung). Die Elektrizität wird durch die elektromotorische Kraft des Elementes in Strömung versetzt. Volta sagte, die elektromotorische Kraft bringe einen Spannungsunterschied an den Polen des Elementes hervor, und der Spannungsunterschied treibe die Elektrizität vom positiven nach dem negativen Pol. Man kann den elektrischen Strom mit einem Wasserstrome vergleichen, der dadurch entsteht, daß das Wasser von einer Stelle größeren Druckes nach einer Stelle geringeren Druckes herabsinkt. In einem Gefäße von der in Fig. 306 abgebildeten Gestalt strömt das Wasser von B durch das Rohr R nach A, solange in B der Druck größer ist als in A. Der Druckunterschied entspricht dem Spannungsunterschiede bei einem elektrischen Strome. Die Druckpumpe P kann dazu dienen, den Druckunterschied konstant zu halten. Wenn die Pumpe ebensoviel Wasser nach B hinaufpumpt, wie von B nach A abfließt, so bleibt die Wasserhöhe in B unverändert, und wenn aus A ebensoviel Wasser nach V abfließt, als durch R zugeführt wird, so entsteht ein konstanter Wasserstrom, der mit einem konstanten elektrischen Strome verglichen werden kann. Der Druckpumpe entspricht die elektromotorische Kraft, die in einem konstanten Element gleichmäßig wirkt.

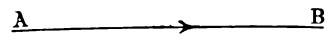
Fig. 306.



Wasserkreislauf.

§ 375. Das Ohmsche Gesetz gilt aber auch für einen Teil eines Stromkreises. Wenn durch den Draht AB (Fig. 307) ein Strom geht, so muß zwischen A und B ein Spannungsunterschied vorhanden sein, und wenn die Spannung in A größer als in B ist, so geht der Strom in der Richtung von A nach B. Vergleicht man auch hier wieder den elektrischen Strom mit einem Wasserstrome, der durch ein Rohr geht, so ist leicht einzusehen, daß das Wasser nur dann von A nach B strömt, wenn

Fig. 307.

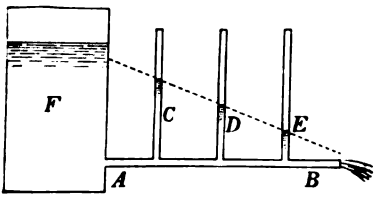


Strom von A nach B.

Digitized by Google

der Druck bei A größer ist als bei B. Der Druck nimmt also die Strombahn entlang ab. Dies wird durch Fig. 308 veranschaulicht. Das Wasser strömt von F durch das Rohr AB. Die Drucke, welche das Wasser weitertreiben, werden durch die Höhen der Wassersäulen in den Röhren C, D und E angegeben. Der Druck nimmt gleichmäßig ab. Ganz ebenso verhält es sich mit der elektrischen Spannung in einem gleichförmigen Metalldraht, der von einem elektrischen Strome durchflossen wird. Die elektromotorische Kraft der Elektrizitätsquelle erzeugt einen Spannungsunterschied, der die ganze Stromleitung entlang wirksam ist, und zwar so, daß an Punkten von gleichem Abstande ein gleichgroßer Spannungsunterschied vorhanden ist. Ist dagegen der Draht, der die Strombahn bildet, nicht von gleichförmiger Beschaffenheit, so nimmt die Spannung nicht proportional der Länge ab. Hat z. B. ein Teil des Drahtes den halben Querschnitt, so verliert sich an dieser Stelle die Spannung doppelt so schnell. An dieser Stelle ist der Widerstand doppelt so groß als da, wo der Querschnitt größer ist, und da der Strom überall in der Leitung dieselbe Stärke hat, so ist der doppelte Spannungsunterschied erforderlich, um den Strom durch den doppelten Widerstand hindurchzutreiben.

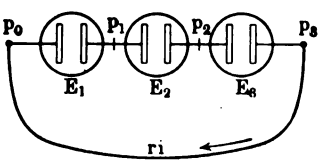
Fig. 308.



Abnahme des Druckes in der Strombahn.

Beispiel 1. E_1, E_2 und E_3 (Fig. 309) sind drei Bunsensche Elemente, deren jedes einen Spannungsunterschied von 1,8 Volt besitzt, wenn die Leitung offen, also kein Strom vorhanden ist. Die gesamte elektromotorische Kraft der drei Elemente ist gleich 5,4 Volt. Der Widerstand eines einzelnen Elementes ist 0,1 Ohm, also der Gesamtwiderstand der drei Elemente 0,3 Ohm. Wir wollen annehmen, der Widerstand in der äußeren Leitung von p_0 bis p_3 sei 1,5 Ohm. Dann ist nach dem Ohmschen Gesetz die Stromstärke $\frac{5{,}4}{1{,}8} = 3$ Ampère. Wenn man nun wissen will, wie groß der Spannungsunterschied zwischen p_0 und p_3 ist, wenn die Leitung geschlossen ist, so wendet man das Ohmsche Gesetz auf diesen Teil des Stromkreises an. Die Stromstärke ist 3 Ampère, der Widerstand 1,5 Ohm, also muß der Spannungsunterschied $3 \times 1{,}5 = 4{,}5$ Volt sein.

Fig. 309.



Spannungsverlust.

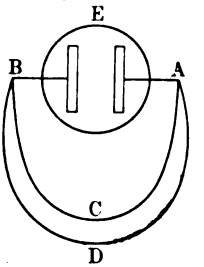
Die elektromotorische Kraft der Batterie ist, wie gesagt, 5,4 Volt. Da wir nun gefunden haben, daß der Spannungsunterschied von p_0 bis p_3 gleich 4,5 Volt ist, so wird die Batterie selbst von einem Strome durchlaufen, der von p_3 bis p_0 einen Spannungsüberschuß von 0,9 Volt hat. Hiermit steht

Digitized by Google

in Einklang, daß das Produkt aus Stromstärke (3 Amp.) und Widerstand (0,3 Ohm) gleich 0,9 (Volt) ist.

Beispiel 2. E (Fig. 310) ist ein galvanisches Element. Der Strom geht von dem einen zum anderen Pol durch eine geteilte Leitung. Der Widerstand in der Leitung ACB sei m_1 und der Widerstand in der Leitung ADB sei m_2. Es fragt sich nun, wie die doppelte Leitung wirkt, und welchen Widerstand eine einzelne Leitung zwischen A und B haben muß, um ebenso zu wirken wie die doppelte.

Fig. 310.



Stromteilung.

Um diese Fragen zu beantworten, müssen wir berücksichtigen, daß die Stromstärke im Elemente gleich der Summe der Stromstärken in den beiden Leitungen ist. Dies folgt einfach daraus, daß in der Strombahn keine Elektrizität aufgespeichert werden kann. Wenn wir den Spannungsunterschied zwischen A und B mit e bezeichnen, so sind nach dem Ohmschen Gesetz die Stromstärken in den beiden Leitungen

$$s_1 = \frac{e}{m_1} \quad \text{und} \quad s_2 = \frac{e}{m_2}.$$

Der gesamte Strom, der durch die beiden Leitungen geht, ist also

$$s = s_1 + s_2 = \frac{e}{m_1} + \frac{e}{m_2}.$$

Wäre nun A mit B durch einen einzigen Draht verbunden, dessen Widerstand n so groß ist wie die beiden Widerstände m_1 und m_2 zusammen, so würde die Stromstärke

$$s = \frac{e}{n}$$

sein. Also ist

$$\frac{e}{n} = \frac{e}{m_1} + \frac{e}{m_2}$$

oder

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}.$$

Der reziproke Wert des Widerstandes ist aber das Leitungsvermögen. Man erhält also das Gesamtleitungsvermögen mehrerer Drähte durch Addition der Leitungsvermögen der einzelnen Drähte.

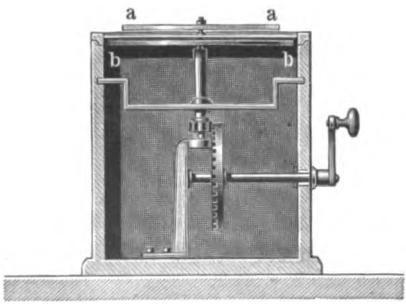
Digitized by Google

Induktion.

§ 376. Faraday hatte vom Jahre 1822 an in seinem Notizbuche eine Abteilung mit der Überschrift „Chemical Notes, Hints, Suggestions and Objects of Pursuit“ (Chemische Notizen, Winke, Anregungen und Gegenstände, die weiter zu verfolgen sind).

In diesen Aufzeichnungen findet man die ersten Anfänge von manchen seiner Entdeckungen. Hier erwähnt er die Aufgaben, mit denen er sich von Zeit zu Zeit beschäftigte. An einer Stelle findet sich die Bemerkung „Umwandlung von Magnetismus in Elektrizität“. Daß sich durch Elektrizität Magnetismus erzeugen läßt, war ja bekannt, aber wie läßt sich der Vorgang umkehren? Es wird erzählt, Faraday habe immer einen kleinen Elektromagneten bei sich gehabt, der ihn, sobald er nicht mit anderen Problemen beschäftigt war, daran erinnern sollte, über diese Frage nachzudenken. Trotzdem zahlreiche Versuche fehlschlugen, ließ sich Faraday in seinem Glauben an die Möglichkeit, Elektrizität durch Magnetismus zu erzeugen, nicht irre machen. — Nun machte Arago 1824 eine Beobachtung, durch die Faraday in hohem Grade zu erneuten Untersuchungen angespornt wurde. Arago beobachtete, daß eine Magnetnadel, die über einer Kupferplatte in Schwingung versetzt wird, auffallend schnell zur Ruhe kommt. Er glaubte anfangs, das Kupfer sei eisenhaltig, allein eine von Dumas ausgeführte chemische Analyse ergab, daß das Kupfer vollkommen eisenfrei war. Um die Erscheinung genauer zu untersuchen, konstruierte Arago den in Fig. 311 abgebildeten Apparat. Die Magnetnadel *a a* ruht auf einer feinen Spitze, und die Kupferscheibe *b b* kann vermittelst einer Kurbel in rasche Drehung versetzt werden. Wenn dies geschieht, so wirkt die Kupferscheibe auf die Magnetnadel ein, selbst wenn sich zwischen beiden eine Glasplatte befindet. Wenn die Kupferscheibe hinreichend schnell gedreht wird, so dreht sich auch die Nadel in derselben Richtung, aber nicht so schnell wie die Kupferscheibe. Der Versuch kann auch umgekehrt ausgeführt werden. Wenn die Kupferscheibe hinreichend leicht beweglich ist, so kommt auch sie in Drehung, wenn die Magnetnadel in Drehung versetzt wird. — Arago und andere waren der Ansicht, daß bei der Drehung Magnetismus in das Kupfer komme, und man sprach von Rotationsmagnetismus. Faraday vermutete dagegen, daß die Nadel durch elektrische Ströme in Bewegung gesetzt

Fig. 311.

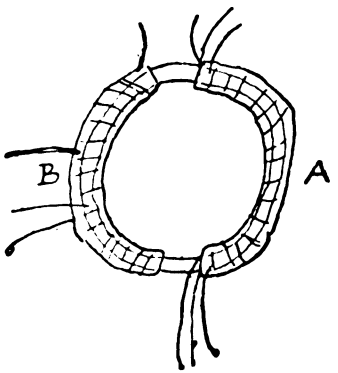


Apparat von Arago.

Digitized by Google

werde, die in der Kupferplatte entstehen. Für diese Annahme sprach auch der Umstand, daß die Wirkung der rotierenden Scheibe bedeutend abgeschwächt wurde, wenn ein radialer Einschnitt in dieselbe gemacht wurde.

Fig. 312.



Faradays Zeichnung.

§ 377. Endlich im Sommer 1831 gelang es Faraday, durch Magnetismus einen elektrischen Strom zu erzeugen. In seinem Notizbuche findet sich die nebenstehende Zeichnung (Fig. 312) nebst folgender Beschreibung. „Ich hatte einen Eisenring (weiches Eisen), $^7/_8$ Zoll dick und 6 Zoll im äußeren Durchmesser. Ich wand viele Windungen von Kupferdraht (um den Eisenring), die Hälfte der Windungen war mit Zwirn und Kattun „separiert"; es waren drei Drahtstücke, jedes 24 Fuß lang, und sie konnten zu einer Länge verbunden oder einzeln benutzt werden .... Ich nenne die eine Seite des Ringes *A*. Die andere Seite, *B*, war mit zwei Drähten umwickelt, zusammen 60 Fuß lang. Die Windungen gingen in *A* und *B* in derselben Richtung .... Ich vereinigte die Drähte *B* zu einem Draht und verband die Enden mit einem Kupferdraht, der dicht über eine Magnetnadel hin ging .... Dann schloß ich den elektrischen Strom einer Batterie durch einen der Drähte *A*. Augenblicklich schlug die Magnetnadel aus, schwang hin und her, kam aber bald in der ursprünglichen Stellung zur Ruhe. Wenn ich dann den Strom unterbrach, so schlug die Nadel wieder aus."

Faraday hatte es also erreicht, mit Hilfe des Magnetismus einen elektrischen Strom in einen Draht einzuführen (zu induzieren). Wenn nämlich der Strom durch einen der Drähte *A* geschlossen wird, so wird der Eisenring magnetisch. Die Pole entstehen zwischen *A* und *B*, da, wo der Ring nicht bewickelt ist. Es entsteht ein magnetisches Feld, und in diesem befinden sich die Drähte *B*. Faraday beobachtete, daß eine Veränderung im magnetischen Felde immer einen elektrischen Strom im Drahte *B* hervorrief, der eine geschlossene Leitung im magnetischen Felde bildete. Wenn das magnetische Feld entstand, so ging ein elektrischer Strom durch *B*, wenn es aber dann in unveränderter Stärke erhalten wurde, so war kein Strom vorhanden. Erst wenn der Strom unterbrochen wurde, wenn sich also das magnetische Feld um *B* änderte, ging wieder ein Strom durch *B*. Dieser Strom dauerte aber ebenso wie der erste nur so lange, wie die Veränderung des magnetischen Feldes dauerte. Die Ströme (oder Stromstöße) in *B* hatten entgegengesetzte Richtung, je nachdem das magnetische Feld um *B* an Stärke zunahm oder abnahm.

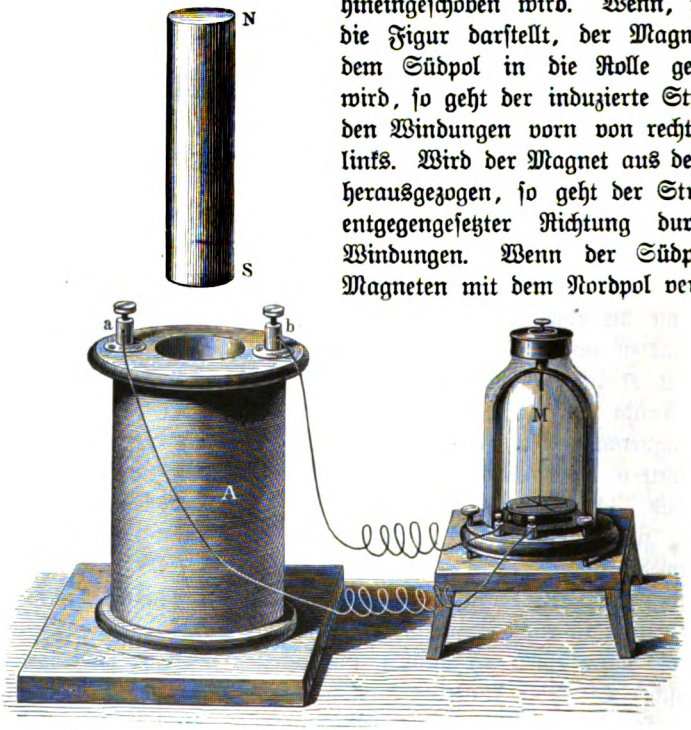
Der Strom entsteht, wenn das magnetische Feld zustande kommt und wenn es verschwindet, oder auch, wenn es an Stärke zunimmt oder ab-

Digitized by Google

nimmt. Der Strom wird Induktionsstrom und der ganze Vorgang Magnetinduktion genannt.

Zur Veranschaulichung der magnetelektrischen Induktion dient in der Regel der in Fig. 313 abgebildete Apparat. *A* ist eine Holzspule, auf welche ein isolierter Kupferdraht aufgewickelt ist, dessen Enden mit dem Multiplikator *M* verbunden sind. In der Drahtrolle wird ein Strom induziert, wenn der Magnetstab *NS* schnell in die Rolle hineingeschoben wird. Wenn, wie es die Figur darstellt, der Magnet mit dem Südpol in die Rolle geschoben wird, so geht der induzierte Strom in den Windungen vorn von rechts nach links. Wird der Magnet aus der Rolle herausgezogen, so geht der Strom in entgegengesetzter Richtung durch die Windungen. Wenn der Südpol des Magneten mit dem Nordpol vertauscht

Fig. 313.



Magnetinduktion.

wird, so laufen die Induktionsströme in entgegengesetzter Richtung als bei Annäherung und Entfernung des Südpols.

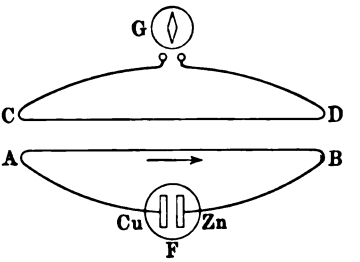
§ 378. Faraday beschreibt diese Versuche im zweiten Teile seiner Abhandlung, die er der Royal Society einreichte. Im ersten Teile dieser Abhandlung berichtet er über seine Entdeckung, daß ein elektrischer Strom auf eine benachbarte Leitung induzierend wirken kann.

Der Strom des Elementes *F* (Fig. 314) geht durch die Leitung *AB*. In die Leitung *CD*, die zu *AB* parallel ist, ist das Galvanometer *G* eingeschaltet. Wenn der Stromkreis *ABF* geschlossen ist, so geht durch *AB* ein Strom in der Richtung des Pfeiles. Es entsteht ein magnetisches Feld, und da sich *CD* in diesem Felde befindet, so entsteht auch in dieser Leitung

Digitized by Google

ein Strom. Der Strom in CD hat, wie das Galvanometer anzeigt, nicht dieselbe Richtung wie der Strom in AB, sondern die entgegengesetzte. Der in CD entstehende Strom ist aber nur von kurzer Dauer; er ist ein Stromstoß. Sobald der Strom in AB, also auch das magnetische Feld um AB, seine volle Stärke erreicht hat, was eine gewisse, wenn auch sehr kurze Zeit dauert, so hört der Strom in CD auf. Wenn aber der Stromkreis ABF unterbrochen wird, so daß der Strom in AB verschwindet, dann verschwindet auch das magnetische Feld um AB und es wird von neuem ein kurzer Strom in CD induziert. Dieser Induktionsstrom hat dieselbe Richtung wie der verschwindende Batteriestrom.

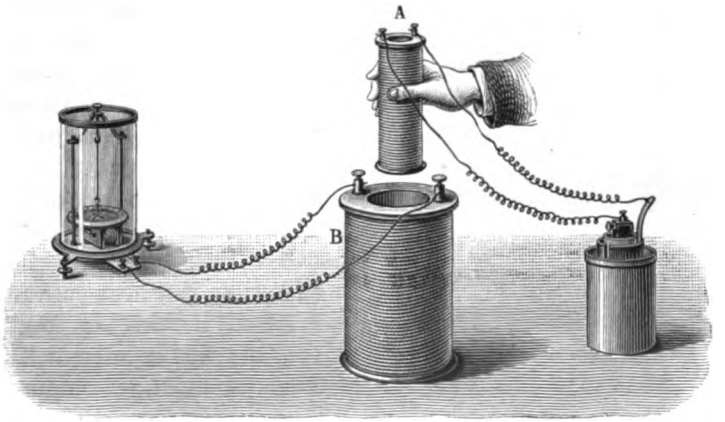
Fig. 314.



Voltainduktion.

Kräftiger tritt diese Voltainduktion, wie sie Faraday nannte, bei Anwendung des in Fig. 315 abgebildeten Apparates hervor. Der Strom

Fig. 315.



Voltainduktion.

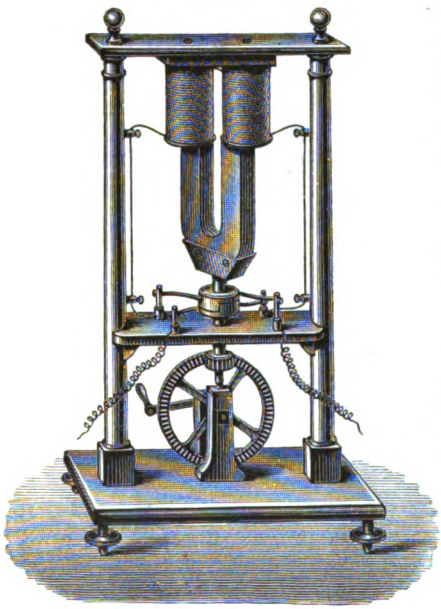
des Elementes, der sogenannte primäre Strom, wird durch eine Drahtrolle gesandt, die in den Hohlraum einer zweiten Rolle, der Induktionsrolle, hineingeschoben werden kann.

Der Draht der Induktionsrolle geht, wie aus der Figur ersichtlich ist, nach einem Galvanometer, durch welches der Induktionsstrom angezeigt wird. Es entsteht jedesmal ein Induktionsstrom, wenn die von dem Hauptstrom durchflossene Spirale der Induktionsspirale mehr angenähert oder von dieser mehr entfernt wird, oder auch, wenn die Stellung der Hauptspirale unverändert gelassen, aber die vom Hauptstrom durchflossene Leitung geschlossen oder geöffnet wird.

Digitized by Google

§ 379. Lenz in Petersburg (1804 bis 1865) hat im Jahre 1834 eine Regel gegeben, vermittelst deren man leicht und sicher die Richtung der Induktionsströme angeben kann, einerlei ob es sich um magnetelektrische Induktion oder um Voltainduktion handelt. Das Lenzsche Gesetz sagt, daß der induzierte Strom stets der Bewegung entgegenwirkt, welche die Ursache der Induktion gewesen ist. Wird z. B. der Südpol des Magneten der Drahtrolle angenähert (Fig. 313), so muß der Induktionsstrom so gerichtet sein, daß die Drahtrolle am oberen Ende einen Südpol erhält (Südpol und Südpol stoßen sich ab). Da bei der Voltainduktion das Schließen des Stromes dieselbe Wirkung hat wie das Annähern eines bereits vorhandenen Stromes, so muß der beim Schließen des Hauptstromes entstehende Induktionsstrom die entgegengesetzte Richtung wie der erstere haben, da entgegengesetzt gerichtete Ströme sich gegenseitig abstoßen. Aus dem Lenzschen Gesetz ergibt sich auch, daß zur Hervorbringung der Induktionsströme Arbeit geleistet werden muß, da ja während der Bewegung ein Widerstand überwunden werden muß.

Fig. 316.



Maschine von Pixii.

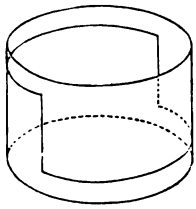
§ 380. Faraday hatte mit seiner Entdeckung der Induktionsströme eine neue Elektrizitätsquelle entdeckt. Bei der magnetelektrischen Induktion wird Elektrizität durch mechanische Bewegung erzeugt. Wenn nämlich der Magnet der Drahtrolle (Fig. 313) angenähert und von derselben entfernt wird, so entstehen Induktionsströme. Sie sind allerdings nur von kurzer Dauer und haben abwechselnd entgegengesetzte Richtungen, aber sie lassen sich durch eine maschinenmäßige Vorrichtung zu einem einzigen gleichförmigen Strom vereinigen. Die Entwickelung dieser Maschinen kann hier nicht eingehend geschildert werden. Nur die Hauptmomente der Entwickelung sollen hervorgehoben werden.

Bereits im Jahre 1832, also kurz vor Faradays Entdeckung, konstruierte Pixii in Paris eine magnetelektrische Maschine (Fig. 316). Über den Polen eines 34 Pfund schweren Hufeisenmagneten, der um eine Achse gedreht werden kann, befindet sich ein mit umsponnenem Messingdraht bewickelter Elektromagnet. Wenn der Magnet in Rotation gesetzt wird, so wird das weiche Eisen des hufeisenförmigen Elektromagneten abwechselnd

Digitized by Google

nordmagnetisch und südmagnetisch. Infolgedessen entstehen in den Drahtwindungen Induktionsströme, die nach jeder halben Umdrehung des Hufeisenmagneten ihre Richtung wechseln. Nähert sich nämlich der Nordpol des Hufeisenmagneten der einen Drahtrolle, so entsteht im Eisenkern derselben unten ein Südpol. Nähert sich dann der Südpol derselben Drahtrolle, so entsteht unten im Eisenkern ein Nordpol. Der Strom muß also die entgegengesetzte Richtung annehmen. Derselbe Vorgang findet gleichzeitig in der anderen Rolle statt, aber hier wirkt der Südpol des Hufeisenmagneten, während auf die erste Rolle der Nordpol wirkt. Wenn daher der Draht auf den einen Eisenkern in entgegengesetzter Richtung gewickelt wird als auf den anderen, so haben die gleichzeitig durch die Wirkung der beiden Pole erzeugten Ströme im ganzen Draht dieselbe Richtung, aber der gesamte Strom wechselt nach jeder halben Umdrehung die Richtung. Die Umwandlung des Wechselstromes in einen gleich gerichteten Strom geschieht durch den sogenannten Kommutator. Dieser besteht aus einem Metallringe, der isoliert auf der Achse sitzt und der in der aus Fig. 317 ersichtlichen Weise in zwei Teile zerschnitten ist, die selbst gegeneinander isoliert sind. Auf dem Metallringe schleifen vier Federn. Zwei derselben stehen mit den Enden des Drahtes in Verbindung, in welchem die Ströme induziert werden, die beiden anderen bilden die Enden der Leitung, in welche die sämtlichen Ströme in gleicher Richtung eintreten sollen. Von den beiden ersten Federn schleift die eine immer auf der oberen, die andere immer auf der unteren Hälfte des Metallringes, während die beiden anderen (die mittleren) nach jeder halben Umdrehung von der einen Hälfte des Metallringes auf die andere übertreten. Der Kommutator ist so auf der Achse befestigt, daß dieser Wechsel immer gleichzeitig mit dem Wechsel der Stromrichtung in der Drahtrolle stattfindet. Die Ströme haben daher in der äußeren Leitung gleiche Richtung, aber die Stärke des Gesamtstromes ändert sich fortwährend. Diesen Mangel hat auch die Maschine von Clark, bei welcher nicht der Hufeisenmagnet, sondern die Drahtrolle rotiert. Die Gesellschaft „Alliance“ in Paris baute große magnetelektrische Maschinen, bei denen eine große Anzahl (bis 100) Rollen, die an einer rotierenden Scheibe befestigt waren, an einer größeren Anzahl von Magnetpolen vorübergeführt wurde.

Fig. 317.



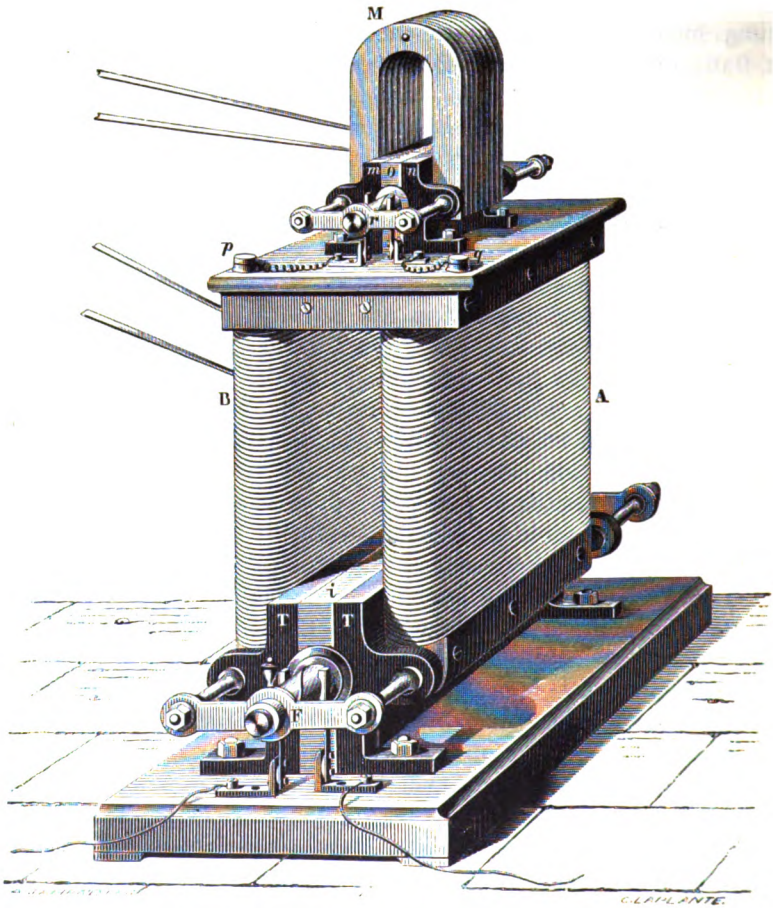
Kommutator.

§ 381. Der nächste Fortschritt bestand darin, daß die permanenten Magneten durch Elektromagneten ersetzt wurden, durch die man viel stärkeren Magnetismus erzeugen konnte. Die Maschine von Wilde (Fig. 318 a. f. S.) besitzt einen solchen Elektromagneten (*A* und *B*). Der Strom, durch den dieser Elektromagnet erregt wird, wird von der kleinen magnetelektrischen Maschine *M* geliefert. Der Draht, in welchem ein Strom induziert werden soll, rotiert bei dieser Maschine nicht vor, sondern zwischen den Polen des Elektromagneten. Er ist der Länge nach um einen die Drehungsachse bil-

Digitized by Google

denden Eiſenſtab gewickelt, deſſen Querſchnitt aus Fig. 319 (*g*, *f*) erſichtlich iſt (Siemensſcher Zylinderinduktor). Die Einrichtung des Strommenders bei dieſen Maſchinen wird durch Fig. 320 veranſchaulicht. Die beiden Enden des Drahtes ſtehen mit den beiden Hälften eines Metallringes in Verbin-

Fig. 318.



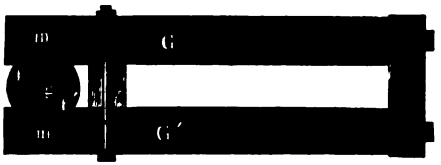
Magnetelektriſche Maſchine von Wilde.

dung, der iſoliert auf der Achſe ſitzt. Vermittelſt zweier Federn, die auf dem Ringe ſchleifen, kann der Strom trotz der wechſelnden Richtung fortwährend in derſelben Richtung von der Achſe abgenommen werden. Während einer halben Umdrehung geht nämlich der Strom nach dem einen Halbringe, der während dieſer halben Umdrehung von der Feder *l* berührt wird, und während der nächſten halben Umdrehung geht der Strom nach dem anderen Halbringe, der jetzt von *l* berührt wird.

Digitized by Google

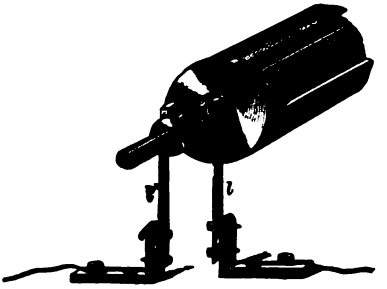
Werner von Siemens (1816 bis 1892) brachte die Sache einen bedeutenden Schritt weiter, indem er 1866 das sogenannte elektrodynamische

Fig. 319.



Siemensscher Zylinderinduktor.

Fig. 320.



Stromwender.

Prinzip aufstellte. Eisen, welches einmal magnetisch gewesen ist, besitzt immer eine Spur Magnetismus, und dieser remanente Magnetismus ist hinreichend, um ein magnetisches Feld zu erzeugen, welches kräftig genug ist, in einem Draht, der in dem Felde rotiert, einen Strom zu induzieren. Wenn also der Elektromagnet AB (Fig. 318) einmal magnetisiert worden ist, so kann er in den Windungen des Induktors einen Strom hervorrufen, und wenn dieser Strom durch die Bewickelung des Elektromagneten geleitet wird, so wird der Magnetismus und folglich auch der durch den Magnetismus erzeugte Strom verstärkt. Die Hilfsmaschine M ist also entbehrlich und die Maschine kommt von selbst in Tätigkeit, wenn der Induktor in Drehung versetzt wird.

Eine derartige Maschine heißt eine dynamoelektrische Maschine oder Dynamomaschine.

Wheatstone hat etwas später als Siemens dasselbe Prinzip gefunden, und ein anderer Engländer, Ladd, behauptete, es schon im Jahre 1864 gefunden zu haben. Diese Prioritätsstreitigkeiten haben wenig Bedeutung. Das gefundene Prinzip ist von solcher Bedeutung, daß ganz gut mehrere die Ehre, es gefunden zu haben, unter sich teilen können. Sören Hjorth (1801 bis 1870), technischer Direktor der ersten dänischen Eisenbahngesellschaft, hat bereits im Jahre 1854 ein Patent auf eine magnetelektrische Maschine genommen, bei der er das dynamoelektrische Prinzip anwandte, indem er den eigenen Strom der Maschine Elektromagneten erregen ließ, die dann wieder auf die rotierenden Magneten der Maschine verstärkend wirkten. Praktische Verwendung fand das Prinzip jedoch erst bei der Maschine von Siemens, weshalb es mit Recht das Siemensche Prinzip genannt wird.

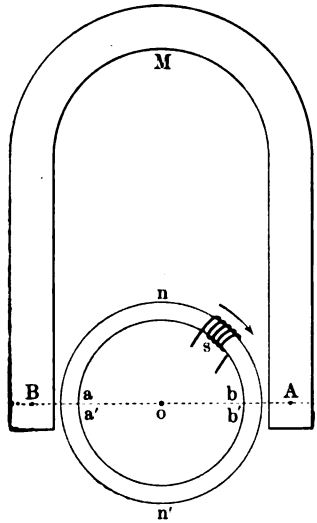
§ 382. Eine weitere wesentliche Verbesserung erfuhr die Dynamomaschine dadurch, daß der Siemenssche Zylinderinduktor durch eine Armatur ersetzt wurde, in der ununterbrochen ein Strom von unveränderlicher Stärke induziert wird. Die erste Anweisung dieses Maschinenteiles wurde 1860 von Luigi Pacinotti (1807 bis 1889), Professor in Pisa, gegeben. Das neue an dieser Vorrichtung, dem Pacinottischen Ring, war, daß der Strom in

Digitized by Google

einem Draht induziert wird, der um einen zwischen den Polen des Magneten rotierenden Eisenring gewickelt ist.

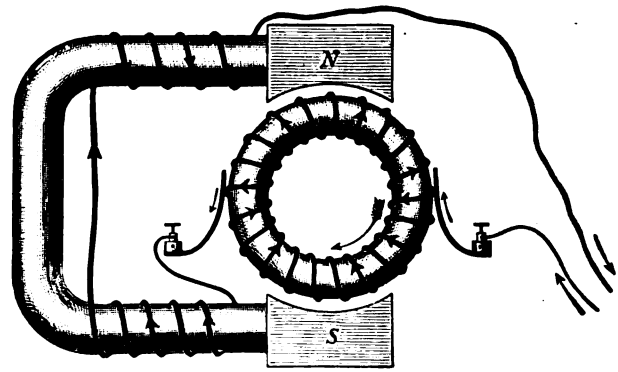
Wir wollen uns zunächst vorstellen, der Ring befinde sich zwischen den Magnetpolen A und B (Fig. 321) in Ruhe. Der Ring bekommt dann bei a und b Magnetpole. Wird nun ein Kupferdraht s lose um den Ring gewickelt und von n nach b geschoben, so wird ein Strom in dem Draht induziert. Umwickelt man den ganzen Ring mit einem in sich selbst zurücklaufenden Draht und verschiebt diesen, so wird in allen Windungen ein Strom induziert. Ist A ein Nordpol und B ein Südpol, so ist bei b ein Südpol und bei a ein Nordpol. Es wird dann in allen Windungen, die von n über b nach n' geschoben werden, ein Strom von derselben Richtung induziert. Der Strom läuft in den Windungen von n nach n'. Dagegen läuft in den Windungen, die von n' über a nach n geschoben werden, der Strom in der entgegengesetzten Richtung, also von n nach n'. Folglich ist bei n' stets eine positive und bei n eine negative Spannung. Wenn also zwischen n' und n außerhalb der Maschine eine leitende Verbindung hergestellt wird, so wird diese von einem gleichförmigen

Fig. 321.



Der Pacinottische Ring.

Fig. 322.



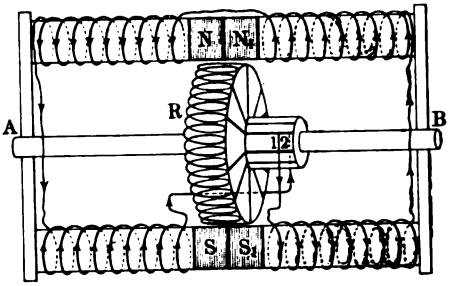
Schematische Einrichtung einer Grammeschen Maschine.

Strome durchlaufen, denn wenn der Draht mit gleichförmiger Geschwindigkeit verschoben wird, so ist auch die Stromstärke immer dieselbe. Eine gleichförmige Verschiebung des Drahtes ist jedoch praktisch nicht ausführbar. Man erreicht aber genau dieselbe Wirkung, wenn man den Draht fest um den

Digitized by Google

Ring wickelt, und den Ring, der aus weichem Eisen besteht, samt der Wicklung zwischen den Polen des Magneten rotieren läßt. Die festen Pole *A* und *B* erzeugen dann fortwährend an denjenigen Stellen des Eisenringes, die an den Polen vorübergeführt werden, die entgegengesetzten Magnetpole und die Windungen werden daher fortwährend durch die beiden Magnetfelder hindurchgeführt.

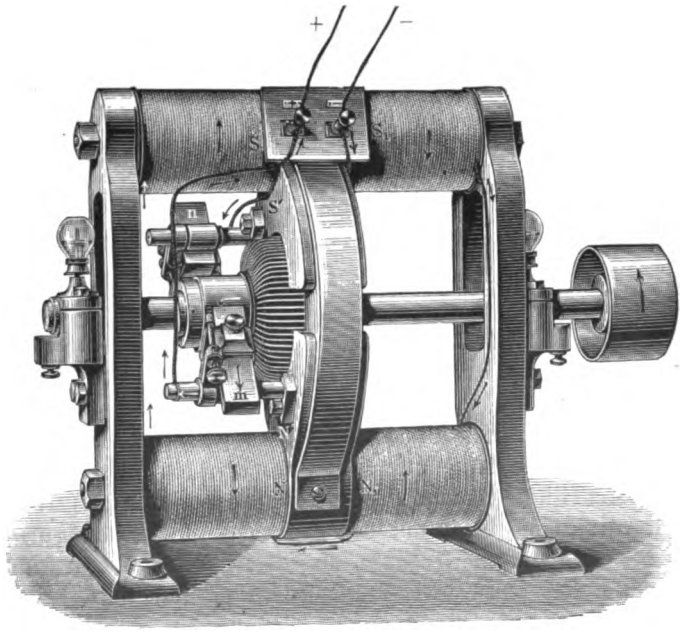
Fig. 323.



Die Bewickelung einer Dynamomaschine.

§ 383. Die Einführung des Pacinottischen Ringes in die Dynamomaschinen geschah durch den Belgier Zénobe Gramme (1826 bis 1901). Gramme war ursprünglich Modelltischler bei der Gesellschaft „Alliance“ in Paris. Er beschäftigte sich mit der Konstruktion einer neuen Dynamomaschine und hat, ohne die Abhandlung Pacinottis zu kennen, selbständig die Ringmaschine erfunden.

Fig. 324.



Grammesche Maschine.

Fig. 322 zeigt schematisch die Einrichtung einer Grammeschen Maschine, bei der das dynamoelektrische Prinzip zur Anwendung gebracht ist. Man kann den Ring auch zwischen mehr als zwei Polen drehen, aber in diesem Falle

Digitized by Google

wird die „Abnahme des Stromes“ umständlicher. Es sind dann mehr als zwei Federn dazu erforderlich.

Wie die Abnahme des Stromes bewerkstelligt wird, ist aus Fig. 323 (a. v. S.) ersichtlich. Zwei weiche Eisenstäbe sind mit übersponnenem Kupferdraht bewickelt, so daß in der Mitte der Stäbe Magnetpole entstehen, wenn der Draht von einem Strome durchflossen wird. Die Bewickelung des Ringes besteht ebenfalls aus übersponnenem Kupferdraht. In gewissen Zwischenräumen ist von den Windungen des Ringes ein Kupferstab nach der Achse geführt und in der Richtung der Achse umgebogen, aber von dieser isoliert. Um die Achse herum liegt ein Ring von isolierender Masse (Ebonit) und in dieser liegen mit freier Oberfläche die Kupferstäbe, ohne sich gegenseitig zu berühren. Die Federn oder Bürsten, wie sie gewöhnlich genannt werden, die den Strom vom Ringe abnehmen sollen, werden nun so angebracht, daß sie auf den Kupferstäben schleifen (Fig. 323, 1 und 2). Fig. 324 ist eine perspektivische Ansicht derselben Maschine.

Dynamomaschinen werden für Gleichstrom und für Wechselstrom, für niedrige und für hohe Spannung gebaut. Ein Wechselstrom von hoher Spannung wird namentlich dann verwendet, wenn es sich darum handelt, den Strom auf große Entfernungen hin fortzuleiten. Auf die Einzelheiten in der Konstruktion der Dynamomaschinen, sowie auf die hoch entwickelte Theorie derselben können wir nicht näher eingehen.

Volta. Oersted. Faraday.

§ 384. Die Entwickelung der Elektrizitätslehre während des 19. Jahrhunderts knüpft sich in erster Linie an die drei Namen Volta, Oersted und Faraday.

Voltas Berührungselektrizität, Oersteds Elektromagnetismus und Faradays Induktionselektrizität sind die Grundpfeiler, auf denen das stolze Gebäude der Elektrizitätslehre ruht. Viele Einzelheiten und größere Teile des Gebäudes legen Zeugnis dafür ab, daß zahlreiche geniale Baumeister an der Errichtung desselben mitgewirkt haben, aber alle haben auf dem Fundamente gebaut, welches von jenen drei Grundpfeilern gebildet wird. Als vierten Grundpfeiler könnte man die chemische Wirkung des Stromes bezeichnen, allein sie schließt sich ja organisch an Voltas galvanisches Element an.

Volta (§ 298) wurde 1779 von Como nach Pavia versetzt. Hier führte er seine grundlegenden Arbeiten aus, die seinen Namen in der ganzen Welt berühmt gemacht haben. Im Gegensatz zu Galvani schwang sich Volta mit Hilfe Napoleons empor. Galvani wurde seines Amtes entsetzt, Volta

Digitized by Google

dagegen, der sich nicht weigerte, den Beamteneid zu leisten, wurde nach Paris berufen, um in der Akademie der Wissenschaften Vorträge über seine Entdeckungen zu halten. Von Napoleon wurde er in den Grafenstand erhoben. Im Jahre 1804 trat er von seinem Lehramte zurück, wurde aber vom Kaiser von Österreich zum Direktor der philosophischen Fakultät in Padua ernannt.

Fig. 325.

Alessandro Volta.

Seine letzten Jahre verlebte er in seiner Vaterstadt Como, wo er 1827 im Alter von 82 Jahren starb.

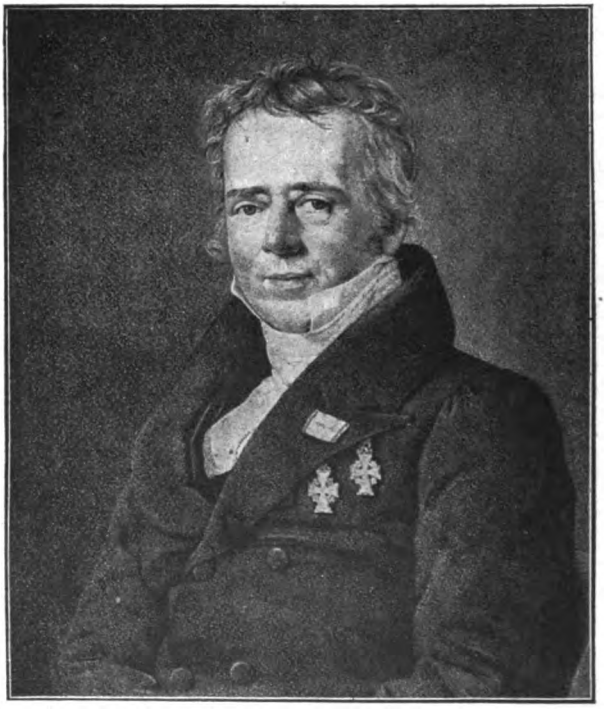
§ 385. Hans Christian Oersted war 1777 in Rudköbing auf Langeland geboren, wo sein Vater Apotheker war. Er wurde zusammen mit seinem jüngeren Bruder Anders Sandöe durch Privatunterricht für die Universität vorbereitet. Sie bezogen beide 1794 die Universität. Hans Christian

Digitized by Google

studierte Chemie, Physik und Mathematik, sein Bruder Jura und Philosophie. Gemeinsam studierten sie Kant und Fichte und später Schelling. Da sie sich die Haupteindrücke, die sie durch ihre Spezialstudien gewannen, gegenseitig mitzuteilen pflegten, bekamen beide eine umfassende und vielseitige Bildung.

Bezeichnend für Hans Christian Oersted ist es, daß er in demselben Jahre (1797), in welchem er das Kandidatenexamen als Pharmazeut bestand, die von der Universität gestellte ästhetische Frage beantwortete. Sie lautete: „Wie kann die prosaische Sprache dadurch, daß sie der poetischen zu nahe

Fig. 326.



H. C. Oersted.

kommt, verdorben werden, und wo sind die Grenzen zwischen dem poetischen und dem prosaischen Ausdruck." Trotz seiner gründlichen naturwissenschaftlichen Studien hatte er Zeit, die Beantwortung der Frage auszuarbeiten, und es war für ihn stets etwas selbstverständliches, auch in den Jahren der angestrengtesten wissenschaftlichen Tätigkeit, am geistigen Leben lebhaften Anteil zu nehmen, auch auf Gebieten, die außerhalb der Grenzen seines Spezialfaches lagen. Im Jahre 1798 beantwortete er die Preisaufgabe der medizinischen Fakultät, und 1799 erwarb er den Doktorgrad.

Im Sommer 1801 trat Oersted eine dreijährige Reise in das Ausland an. Er reiste über Deutschland nach Paris und kehrte über Belgien und

Digitized by Google

Holland in die Heimat zurück. Er hatte auf dieser Reise die persönliche Bekanntschaft der hervorragendsten Gelehrten der genannten Länder gemacht, und während der Reise war in ihm der Entschluß gereift, nach seiner Rückkehr etwas zur Förderung des naturwissenschaftlichen Studiums zu tun, welches namentlich hinsichtlich der Physik viel zu wünschen übrig ließ.

Nach seiner Rückkehr hielt er in Kopenhagen öffentliche Vorlesungen, die für die damalige Zeit stark besucht waren. Im Jahre 1806, als er Professor der Physik an der Universität geworden war, schrieb er an seinen Freund Oehlenschläger: „Meine Vorlesungen sind im Winter stark besucht. Anfangs hatte ich über 60 Zuhörer und nach vier Monaten noch über 40. Wenn sie nur bessere Zahler wären. Diese Vorlesungen werden von Männern und Frauen besucht, doch sind es von den letzteren nur fünf."

Oersted kam durch seine Studien und seine Reisen in Beziehung zu den Romantikern und Naturphilosophen, deren Ansichten er sich anschloß. Allein er war ein selbständiger Schüler Kants und als Naturforscher viel nüchterner als die meisten Schüler Schellings. Charakteristisch für ihn ist der Ausspruch, daß Newton und Kant die beiden Pole seien, um die sich die neuere Naturforschung drehe. In den Jahren 1812 und 1813 unternahm er eine zweite Reise in das Ausland. Auf dieser Reise schrieb er in Berlin die in § 360 erwähnte kleine Abhandlung über den Zusammenhang der Naturkräfte.

Später bildete er seine Naturanschauung genauer aus und schloß sich dabei vollständig an Kant an, der annimmt, daß die körperliche Natur nur ein Ausdruck für raumerfüllende Kräfte ist, die wieder auf zwei Grundkräfte zurückgeführt werden können. Nach der Ansicht Oersteds zeigten sich diese Kräfte am reinsten und freiesten in der positiven und negativen Elektrizität. Von diesen beiden Kräften wirkt jede für sich allein ausdehnend oder abstoßend, beide zusammen dagegen wirken, einander gegenübergestellt, anziehend. Oersted nannte in Übereinstimmung hiermit die Elektrizitätslehre Dynamik (Kraftlehre) in höherem Sinne. Auf diesem Gebiete hatte er eine andere Grundauffassung als Schelling. Dieser sprach ebenfalls von zwei Grundkräften, aber er nahm an, die eine sei eine ausdehnende und die andere eine zusammenziehende Grundkraft.

In der Chemie brachte Oersted seine Theorie der beiden entgegengesetzten Grundkräfte zur Anwendung. Die Grundstoffe, welche die entgegengesetzten Kräfte repräsentieren, ziehen sich einander an und streben nach chemischer Vereinigung. Die Basen repräsentieren die positive, die Säuren die negative Kraft. Bei der Vereinigung von Grundstoffen von entgegengesetzter Natur oder von Basen und Säuren entsteht eine Feuer- oder Wärmeerscheinung als Ausdruck für die Wirkung, welche bei der Vereinigung stattfindet.

Hieraus geht hervor, daß Oersted ebenso wie Davy und Berzelius (vgl. § 351) in selbständiger Weise eine einheitliche Auffassung der Naturerscheinungen suchte und fand.

Über seine Entdeckung des Elektromagnetismus ist früher ausführlich berichtet worden. Oersted wurde, wie man sich leicht denken kann, Mitglied

Digitized by Google

der angesehensten gelehrten Gesellschaften in der ganzen Welt. Seine letzte Reise ins Ausland, die er 1846 unternahm, war, wie sein Begleiter Forchhammer schreibt, ein wahrer Triumphzug. Überall wurde er von Gelehrten und Staatsmännern aufgesucht. Auf der Naturforscherversammlung in Southampton, der er beiwohnte, sagte John Herschel unter anderem: „In der Wissenschaft kenne ich nur eine Richtung, die die Magnetnadel nehmen könnte, wenn sie nach dem Festlande Europas deutete, nämlich auf meinen Freund, Professor Oersted."

Abgesehen von seinen wissenschaftlichen Arbeiten entfaltete Oersted eine große Tätigkeit, um das Studium der Physik an der Universität und den Unterricht in den Naturwissenschaften überhaupt zu fördern. Er war davon überzeugt, daß die Naturwissenschaft „dem Gewerbetreibenden mehr zugänglich ist als andere Kenntnisse; mit ihrer materiellen Seite ist sie ihm handgreiflich; mit ihrem geistigen Inhalt erhebt sie ihn und gibt ihm eine höhere Bildung".

Im Jahre 1823 gründete er die Gesellschaft für Verbreitung der Naturlehre, die heute noch besteht und die bezweckt, „Kenntnisse in der experimentellen Naturwissenschaft unter den Mitbürgern aller Stände zu verbreiten". Auf seine Anregung wurde 1829 die polytechnische Lehranstalt in Kopenhagen errichtet. — Oersted selbst fing an, in Kopenhagen populäre Vorträge über Naturwissenschaften zu halten und sein Beispiel fand alsbald in den kleineren Städten des Landes Nachahmung. Hier finden sich die ersten Keime des Gewerbevereins in Kopenhagen, sowie der technischen Gesellschaften und Schulen, die jetzt in allen Städten des Landes existieren und die auf die Entwickelung des Handwerks und der Industrie einen großen Einfluß ausgeübt haben.

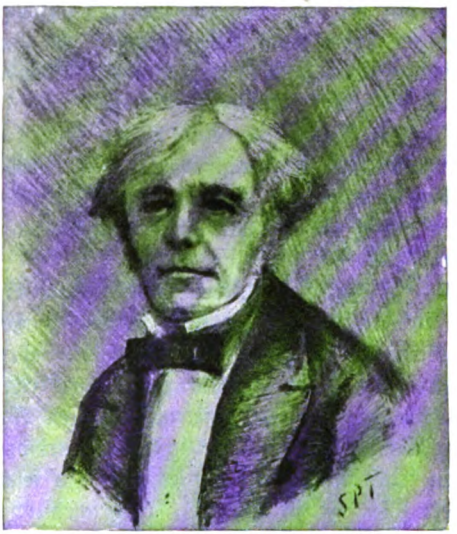
Oersted nahm bei seiner umfassenden allgemeinen Bildung, seinem Verständnis für die verschiedenen Seiten des geistigen Lebens, für Wissenschaft, für Poesie, für Kunst und für Volksaufklärung eine hervorragende Stellung in der Gesellschaft ein. Er verstand es, diese davon zu überzeugen, daß jeder zur Bildung seiner eigenen Lebensanschauung aus der Naturwissenschaft Nutzen ziehen kann. Seine Auffassung des Zusammenhanges der verschiedenen Gebiete des geistigen Lebens, sowie der ganzen Natur als einer großen Harmonie, ist auf viele seiner Zuhörer übergegangen, und hierdurch hat er direkt und indirekt wesentlich dazu beigetragen, dem geistigen Leben in Dänemark ein selbständiges und nationales Gepräge zu verleihen. Zusammen mit seinem Bruder, der einer der bedeutendsten Rechtslehrer Dänemarks wurde und der auf die inneren politischen Verhältnisse seines Vaterlandes einen bedeutenden Einfluß ausgeübt hat, bildete Oersted einen der Mittelpunkte, von denen das geistige Leben in Dänemark entscheidende und richtende Impulse bekommen hat. Als er im Jahre 1851 starb, hatte man im ganzen Lande die Empfindung, daß ein wirklich großer Mann aus dem Leben geschieden war.

§ 386. Michael Faraday, der dritte der drei großen Elektriker, erhielt seine Ausbildung auf anderem Wege als Oersted und Volta, die beide wohlhabenden Familien angehörten und im Kreise von befreundeten Altersgenossen ein regelrechtes Universitätsverstudium absolvierten. Faradays Vater war ein

Digitized by Google

armer Grobschmied, der vom Lande nach einem Vororte Londons übergesiedelt war. Seine Mutter war die Tochter eines Bauern, eine gute Mutter und eine tüchtige Hausfrau, aber ohne höhere Bildung. Der Sohn wurde, nachdem er einen ziemlich mangelhaften Schulunterricht genossen hatte, 1804 im Alter von 13 Jahren Laufbursche und ein Jahr später Lehrling bei dem Buchhändler und Buchbinder Riebau. Hier hatte er Gelegenheit zum Lesen, und er war bald in das Studium naturwissenschaftlicher Bücher vertieft. Im Winter 1810 bis 1811 hörte er zwölf naturwissenschaftliche Vorträge eines Herrn Tatum, und im Frühjahre 1812 fand er Gelegenheit, den Vorträgen H. Davys in der Royal Institution beizuwohnen. Er schrieb die Vorträge nieder und versah sie mit guten Zeichnungen. Alsbald regte sich in ihm der Wunsch, seine gegenwärtige Tätigkeit, die ihn wenig befriedigte, aufzugeben und als Gehilfe in die Royal Institution eintreten zu können. Im Herbst 1812 schrieb er an Davy. Dieser antwortete ihm freundlich, riet ihm aber, einstweilen bei der Buchbinderei zu bleiben. Der junge Mann hatte aber einen günstigen Eindruck auf Davy gemacht und dieser stellte ihn im Frühjahre 1813 als Assistenten an. Als solcher hatte er die Versuche für die Vorlesungen vorzubereiten und die Apparate nach den Vorlesungen zurückzustellen, aber alsbald bestand seine Haupttätigkeit darin, daß er Davy bei seinen wissenschaftlichen Untersuchungen behilflich war.

Fig. 327.



Michael Faraday.

Im Herbst 1813 begleitete er Davy auf einer Reise nach Frankreich und Italien, und trotz seines bescheidenen Auftretens machte er sich neben seinem berühmten Meister bemerklich. Dumas schrieb später: „Davy bewunderten wir, aber Faraday liebten wir.“ Seine Entwickelung machte auf dieser Reise große Fortschritte; er sah die große Welt und kam mit großen Gelehrten, z. B. in Mailand mit Volta, in Berührung. Diese Reise erweiterte seinen Gesichtskreis und bewahrte ihn vor der Gefahr, ein einseitiger Fachgelehrter zu werden. Er kam auf der Reise mit hervorragenden Gelehrten in Berührung und lernte wirkliche Forschung und wahre Gelehrsamkeit kennen, die sich niemals in feste, erstarrte Formen einzwängen lassen. Faraday

Digitized by Google

hat ohne Zweifel auf dieser Reise seinen Sinn für eine klare und feine Form in Sprache und Schrift geschärft; ebenso hat sich seine Gewandtheit im Verkehr mit gebildeten Männern bei dieser Gelegenheit entwickelt.

Nach seiner Rückkehr setzte er seine Arbeiten in der Royal Institution fort und er wurde bald ein ausgezeichneter Experimentator und vortrefflicher Redner. Er hielt Vorträge in einem Kreise von Altersgenossen, die sich zu einer „philosophischen Gesellschaft" vereinigt hatten. Im Jahre 1824 wurde er Mitglied der Royal Society und 1825 Direktor der Royal Institution. Die letztere Stellung bekleidete er bis 1865.

Faradays Stärke als Forscher lag in seinem Drange nach Klarheit. Immer suchte er der Sache auf den Grund zu kommen, und immer war er darauf bedacht, für neue Begriffe passende Namen zu wählen, wobei er nicht selten befreundete Sprachgelehrte zu Rate zog. So waren ihm z. B. die früher erwähnten Bezeichnungen Anode, Kathode u. s. w. (§ 352) von W. Whewell empfohlen worden.

Faraday hat eine riesige Arbeit ausgeführt. Das Geheimnis seiner erstaunlichen Leistungsfähigkeit liegt, mit seinen eigenen Worten gesagt, darin, daß er arbeitete, abschloß und veröffentlichte. Daß mancher fleißige Forscher so wenig geleistet hat, hat seinen Grund oft darin, daß er nicht abzuschließen verstand.

Faradays Untersuchungen betreffen vorzugsweise magnetische, elektrische und chemische Verhältnisse. Einen großen Einfluß hat seine Auffassung der Wirkung der Fernkräfte ausgeübt. Er zeigte (§ 295), daß die elektrische Kraft bei ihrer Fortpflanzung durch schlechte Leiter in diesen eine molekulare Veränderung hervorruft, mit anderen Worten, daß die Fernwirkung nur eine scheinbare ist. In Wirklichkeit schreitet die Wirkung der Fernkraft von Molekül zu Molekül fort. Faraday hat in seinen Abhandlungen nie Gebrauch von der Mathematik gemacht, wahrscheinlich weil er sie nicht in hinreichendem Grade beherrschte. Aber später hat sein Landsmann James Clerk Maxwell (1831 bis 1879), Professor der mathematischen Physik an der Universität in Cambridge, die Anschauungen Faradays in die Sprache der Mathematik eingekleidet. Er hat durch mathematische Untersuchungen nachgewiesen, daß sich die Fernkräfte, die dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional wirken, durch Spannungen in dem „Medium" erklären lassen, durch welches die aufeinander einwirkenden Körper getrennt sind.

Was die Elektrizität betrifft, so ist unter anderen durch den Duterschen Versuch (§ 244) bewiesen, daß Isolatoren in einen eigentümlichen molekularen Zustand kommen, wenn sie die elektrische Kraft fortpflanzen. Für die Schwerkraft dagegen ist bis jetzt etwas ähnliches nicht nachgewiesen. Faradays Auffassung der Fernkräfte hat also noch keine experimentelle Bestätigung gefunden, aber sie bildet die Grundlage für alle Betrachtungen über diese wichtige Frage.

Früher (I, § 442) ist mitgeteilt worden, wie Faraday durch einen schönen Versuch gezeigt hat, daß die Lichtschwingungen durch die molekularen

Digitized by Google

Veränderungen beeinflußt werden, die in einer Kristallplatte vor sich gehen, wenn sie in ein kräftiges magnetisches Feld gebracht wird.

Faraday wurde noch berühmter als sein Lehrer H. Davy, allein er bewahrte im Gegensatz zu diesem sein schlichtes Wesen und lebte mit seiner Frau still und zurückgezogen in seinem Heim. Er gehörte einer kleinen kirchlichen Gesellschaft an, in der er öfter das Wort führte, weil er das Bedürfnis hatte, für seinen christlichen Glauben Zeugnis abzulegen. Er war einerseits ein kritischer und prüfender Forscher und anderseits ein Mensch von kindlichem Gemüt und ausgeprägtem Sinn für das, was durch das Herz und nicht durch den Verstand aufgenommen wird. Er starb 1867.

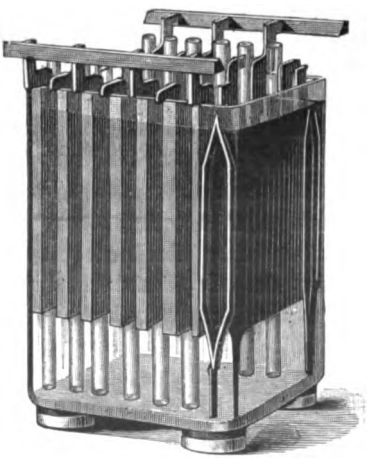
Akkumulatoren.

§ 387. Bevor wir dazu übergehen, noch einige Anwendungen des elektrischen Stromes zu betrachten, die im vorhergehenden noch nicht erwähnt worden sind, müssen wir uns mit den Akkumulatoren bekannt machen. Dies sind sogenannte sekundäre Elemente, d. h. Elemente, die ihre Kraft der Wirkung des elektrischen Stromes verdanken.

Ritters Ladungssäule (§ 318) ist ein sekundäres Element, aber der erste praktisch verwendbare Apparat dieser Art wurde erst 1860 von Gaston Planté, Professor der Physik in Paris, konstruiert. Er wickelte zwei Bleiplatten von 1 mm Dicke, 60 cm Länge und 15 cm Breite, die durch Gummistreifen von 5 mm Dicke voneinander getrennt waren, spiralförmig auf.

Er setzte die Spirale in angesäuertes Wasser und ließ einen elektrischen Strom (den Ladungsstrom) von der einen Platte durch das Wasser zur anderen Platte gehen. Das Wasser wurde zersetzt und die eine Platte stark oxydiert. Wird dann der Strom unterbrochen, so geben die Platten selbst einen Strom, wenn sie durch eine Leitung verbunden werden, und zwar hat dieser Strom die entgegengesetzte Richtung als der Ladungsstrom (vgl. § 318). Jetzt scheidet sich also an der oxydierten Platte Wasserstoff ab und das Bleioxyd wird reduziert. Das entstehende Blei hat eine poröse Beschaffenheit und nimmt infolgedessen eine größere Menge Sauerstoff auf, wenn das Element von neuem geladen wird. — Camille Faure änderte 1881 die Form des Apparates, der jetzt den Namen Akkumulator bekam, in der Weise ab, daß er die Bleiplatten im ungerollten Zustande in einen viereckigen Glastrog setzte (Fig. 328). Hier wird gleichzeitig eine größere Anzahl von

Fig. 328.

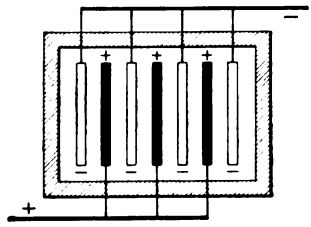


Akkumulator.

Digitized by Google

Platten, die abwechselnd miteinander verbunden sind (Fig. 329) geladen. Um den Bleiplatten eine möglichst große Aufnahmefähigkeit für Sauerstoff zu verleihen, wird die sogenannte Formierung des Akkumulators vorgenommen, die darin besteht, daß er wiederholt geladen und wieder entladen wird. Die Platten bekommen dadurch eine schwammige Beschaffenheit, und zwar am meisten die Anode des Ladungsstromes. Die Formierung wird dadurch erleichtert, daß man die Bleiplatten mit einer Schicht Mennige überzieht. Die negative Platte wird gewöhnlich mit Furchen oder quadratischen Vertiefungen versehen, in welche Bleioxyd eingepreßt wird. Wenn ein solcher Akkumulator geladen wird, so werden die Platten der einen Gruppe stark oxydiert, die der anderen Gruppe reduziert. Nach beendeter Ladung stehen sich Bleiplatten einander gegenüber, die in sehr ungleichem Grade oxydiert sind. Die chemische Verschiedenheit der Platten erzeugt die elektromotorische Kraft, die bei voller Ladung 2,5 Volt beträgt und die während der Entladung auf 2 Volt sinkt. Wenn die Platten groß und der Abstand derselben gering ist, so ist der Widerstand, den der Akkumulator dem Ladungsstrome entgegensetzt, nur gering. Natürlich wird er durch die Polarisation der Platten geschwächt, in die der Ladungsstrom umgesetzt wird. Die Energie des Stromes wird in chemische Energie umgesetzt und diese wird in den Bleiplatten aufgespeichert. Wenn der Akkumulator entladen wird, so wird die chemische Energie wieder in Stromenergie umgesetzt. — Da in dem geladenen Akkumulator keine chemische Veränderung vor sich geht, wenn die Platten nicht in leitende Verbindung gesetzt werden, so kann die Energie in den Akkumulatoren lange Zeit aufbewahrt werden.

Fig. 329.



Verbindung der Platten des Akkumulators.

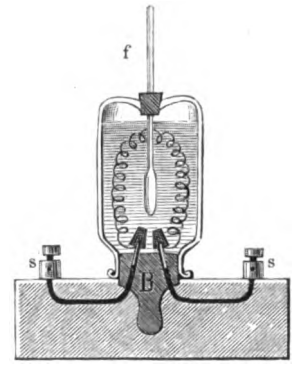
Während der Entladung sinkt die elektromotorische Kraft des Akkumulators schnell auf 2 Volt und dann bei fortschreitender Entladung auf 1,8 Volt. Der Akkumulator erträgt weder beim Laden noch beim Entladen einen starken Strom. In der Regel darf der Strom für jedes stromaufnehmende oder stromabgebende Quadratdezimeter der Akkumulatorfläche 0,6 Ampère nicht übersteigen. Bei einem guten Akkumulator hat jedes Quadratdezimeter Oberfläche eine Kapazität (Aufnahmefähigkeit) von ungefähr 2 Ampèreſtunden.

Digitized by Google

Erzeugung von Wärme und Licht durch den elektrischen Strom.

§ 388. Ein elektrischer Strom erzeugt in der Strombahn stets Wärme. Ältere Beobachtungen über die durch den elektrischen Funken erzeugte Wärme sind früher (§ 301) erwähnt worden. Später fand man, daß der elektrische Strom um so mehr Wärme entwickelt, je größer der Widerstand ist, den er zu überwinden hat. Davy suchte das Leitungsvermögen der verschiedenen Metalle durch Messung der Wärme zu vergleichen, die der elektrische Strom in Drähten dieser Metalle entwickelte. Vollkommen aufgeklärt wurde die Wärmewirkung des elektrischen Stromes jedoch erst durch J. P. Joule. Die betreffenden Versuche sind dieselben, mit denen er seine Untersuchungen über das Wärmeäquivalent begann.

Fig. 330.



Wärmewirkung des elektrischen Stromes.

In Fig. 330 ist der Apparat abgebildet, mit dem Lenz die von Joule erzielten Resultate bestätigt hat. Die Poldrähte werden bei s und s eingeklemmt, so daß der Strom, wie aus der Figur ersichtlich ist, zwei dicke Drähte und eine Spirale aus dünnem Draht durchlaufen muß. Die letztere ist von Spiritus umgeben, dessen Temperatur an dem Thermometer f abgelesen werden kann. Die in einer gewissen Zeit, z. B. einer Sekunde, durch den Strom entwickelte Wärme läßt sich leicht berechnen, wenn man die Temperaturerhöhung, die der Spiritus erleidet, sowie die spezifische Wärme des Spiritus kennt. Die letztere ist 0,6.

Joule fand, daß die durch den Strom entwickelte Wärmemenge bei unveränderter Stromstärke dem Widerstande proportional, bei unverändertem Widerstande dagegen dem Quadrat der Stromstärke proportional ist (das sogenannte Joulesche Gesetz).

Ein Strom von 1 Ampère erzeugt in einem Widerstande von 1 Ohm in einer Sekunde 0,24 Grammkalorien.

Wenn man dieses weiß, so kann man mit Hilfe des Jouleschen Gesetzes leicht die Wärmemenge berechnen, die in einer Leitung erzeugt wird, wenn man die Stromstärke und den Widerstand kennt. In einer Leitung von 20 Ohm Widerstand erzeugt z. B. ein Strom von 5 Ampère in 5 Minuten $0{,}24 \times 20 \times 5^2 \times 300 = 36\,000$ Grammkalorien.

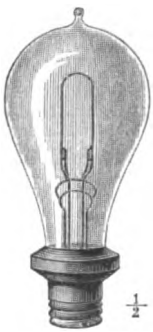
Digitized by Google

Es ist zu beachten, daß die Wärmewirkung des Stromes viel stärker wächst als die Stromstärke. Wenn z. B. zwei Leitungen mit großem Spannungsunterschiede miteinander in Berührung kommen (Kurzschluß), so kann bei geringem Widerstande der Leitungen ein sehr starker Strom entstehen. Es liegt dann die Gefahr nahe, daß die Stromleitung durch die entstehende Hitze zerstört (geschmolzen) wird. Um dies zu verhindern, schaltet man einen kurzen Bleidraht, eine sogenannte **Bleisicherung** in die Leitung ein. Wenn dann der Strom zu einer gefahrdrohenden Stärke anwächst, so schmilzt die Bleisicherung und der Strom wird unterbrochen, ehe die eigentliche Leitung Schaden gelitten hat.

§ 389. Das Glühendmachen vermittelst des elektrischen Stromes findet ausgedehnte Anwendung bei den elektrischen Glühlampen. Bereits 1841 hat **Moleyns** in England eine elektrische Glühlampe konstruiert. Sie bestand aus einer Glaskugel, durch die ein in die Glaswand eingeschmolzener Platindraht hindurchging, der durch den elektrischen Strom glühend gemacht war. Der Draht wurde mit Kohlenstaub bestreut und die Kugel so gut als möglich luftleer gemacht. Die Kohle kam dann ebenfalls ins Glühen und strahlte ein kräftiges weißes Licht aus. Die Lampe hatte jedoch den Fehler, daß sie leicht unbrauchbar wurde, indem der Platindraht schmolz, wenn der Strom die normale Stärke überschritt.

Eine neue Glühlampe wurde 1845 vom Amerikaner **Starr** konstruiert. Sie enthielt anstatt eines Platindrahtes ein dünnes Kohlenstäbchen (Retortenkohle). Aber selbst wenn die Kugel gut ausgepumpt war, wurde die Lampe alsbald unbrauchbar, weil in den Poren der Kohle Luft eingeschlossen war und das Kohlenstäbchen infolgedessen durchbrannte. Man ging daher wieder zu den Metalldrähten über. Es wurde auch (1858) ein Regulator erfunden, der es verhinderte, daß der Strom die zulässige Stärke überschritt und die Lampe durch Schmelzen des Drahtes zerstörte. Trotzdem fand die Glühlampe einstweilen noch keine praktische Verwendung, weil das Licht, welches der glühende Platindraht ausstrahlte, nicht intensiv genug war. Erst nachdem der bekannte amerikanische Erfinder **Th. Edison** (geb. 1847) im Jahre 1879 den Platindraht durch einen Kohlenfaden (verkohlte Bambusfaser) ersetzt hatte, fand die Glühlampe praktische Verwendung. Der Kohlenfaden ist in eine Glasbirne eingeschlossen (Fig. 331). Die Enden desselben sind an zwei in das Glas eingeschmolzenen Platindrähten befestigt, von denen der eine mit einer Metallplatte am unteren Ende der Birne, der andere mit einem metallenen Schraubengewinde am Halse der Birne in Verbindung steht. Die Lampe wird in einen Halter eingeschraubt, der so eingerichtet ist, daß der Draht, welcher den Strom zuleitet, mit dem Schraubengang, und der Draht, welcher den Strom ableitet, mit der Metallplatte in Berührung kommt.

Fig. 331.



Glühlampe.

Es ist sehr wesentlich, daß der Glühfaden überall dieselbe Dicke hat.

Digitized by Google

Andernfalls glüht er an den Stellen von verschiedener Dicke ungleich stark und brennt an der Stelle, wo er am dünnsten ist, alsbald durch. Um dem Faden eine gleichmäßige Dicke zu geben, taucht man ihn in einen Kohlenwasserstoff von hohem Kohlenstoffgehalt (z. B. Gasolindampf) ein und bringt ihn durch einen elektrischen Strom zum Glühen. Es scheidet sich dann Kohlenstoff aus, der sich auf der Oberfläche des Fadens als ein stahlglänzender Überzug ausscheidet, und zwar am meisten an denjenigen Stellen, die am stärksten glühen, d. h. an denen der Faden am dünnsten ist.

Von der Länge und Dicke des Fadens, sowie von der Lichtstärke, die erreicht werden soll, hängt die Spannung ab, die erforderlich ist, um den Faden zum Glühen zu bringen. Die Dimensionen der Glühlampen werden in der Regel so gewählt, daß sie eine Spannung von 65, 100 oder 110 Volt erfordern. Die Lichtstärken sind gewöhnlich gleich 16, 25 oder 32 Normalkerzen. Es lassen sich aber auch schwächere und stärkere Lampen konstruieren. Die Brenndauer einer Lampe ist verschieden, je nachdem sie mehr oder weniger ökonomisch mit Rücksicht auf den Verbrauch von Elektrizität brennt. Je höher die Temperatur ist, auf die der Faden erhitzt wird, desto mehr Stromenergie wird in Licht umgesetzt. Bei hoher Temperatur wird aber der Draht schneller zerstört als bei niedriger Temperatur.

§ 390. Der Elektrizitätsverbrauch einer Glühlampe läßt sich mit Hilfe der Gesetze über die Wärmewirkung des elektrischen Stromes berechnen, wenn man sich zugleich erinnert, daß das mechanische Wärmeäquivalent 424 Meterkilogramm ist.

Ist die Stromstärke i und der Widerstand, den der Strom zu überwinden hat, w, so entwickelt der Strom in der Leitung nach dem Jouleschen Gesetz in einer Sekunde $0{,}24 \times i^2 \times w$ Grammkalorien. Die gesamte Arbeit, welche der Strom leistet, besteht in der Entwickelung von Wärme.

Die in einer Sekunde entwickelte Wärme ist also gleich $0{,}24 \times i^2 \times w$ Grammkalorien. Das Produkt $i \times w$ ist aber nach dem Ohmschen Gesetz gleich der Spannung des Stromes in Volt ausgedrückt (Ampère × Ohm = Volt). Nennt man diese e, so geht der Ausdruck für die entwickelte Wärmemenge über in $0{,}24 \times i \times e$ Grammkalorien oder $\frac{0{,}24 \times i \times e}{1000}$ Kilogrammkalorien. Um diese Wärmemenge in Meterkilogramm umzuwandeln, muß man sie mit 424 multiplizieren. Also ist der Arbeitswert des Stromes per Sekunde

$$\frac{0{,}24 \times i \times e}{1000} \times 424 = 0{,}10176 \times i \times e$$

Meterkilogramm. Das Arbeitsvermögen des Stromes ist also dem Produkt aus der Stromstärke (Ampère) und der Spannung (Volt) proportional.

Um zu ermitteln, wieviel „Volt-Ampère" ein Strom haben muß, damit sein Arbeitsvermögen gleich einer Pferdekraft ist, muß man sich erinnern, daß die Pferdekraft diejenige Kraft ist, welche in einer Sekunde eine Arbeit von 75 Meterkilogramm leistet. Aus der Gleichung

Digitized by Google

$$0{,}10176 \times i \times e = 75$$

ergibt sich

$$i \times e = 736 \text{ Volt-Ampère.}$$

Eine Pferdekraft entspricht also einer Stromenergie von 736 Volt-Ampère oder 736 Watt. Eine Dynamomaschine, die bei einer Spannung von 150 Volt einen Strom von 10 Ampère liefert, leistet in einer Sekunde eine Arbeit von 1500 Watt oder $\frac{1500}{736} = 2{,}04$ Pferdekräften.

§ 391. Jetzt können wir auch die von einer Glühlampe verbrauchte Energie berechnen. Im allgemeinen kann man rechnen, daß jede Lichtstärke von einer Normalkerze 3 Watt braucht. Eine 16-Kerzenlampe braucht also 48 Watt. Wenn man keine Rücksicht auf die Lebensdauer der Lampe nimmt, so kann man die Lichtstärke von einer Normalkerze mit 1,5 Watt erzeugen. In diesem Falle muß der Widerstand des Kohlenfadens größer, also der Faden dünner sein. Je dünner der Kohlenfaden aber ist, desto schneller wird er unbrauchbar. Die Brenndauer einer Lampe, in welcher 3 Watt eine Lichtstärke von einer Normalkerze erzeugen, ist ungefähr 1000 Stunden, die Brenndauer einer Lampe, in welcher 1,5 Watt dieselbe Lichtstärke erzeugen, dagegen nur 250 Stunden. Rechnet man 3 Watt für eine Normalkerze, so gibt eine (elektrische) Pferdekraft eine Lichtstärke von $\frac{736}{3} = 245{,}3$ Normalkerzen.

§ 392. Die älteste elektrische Lampe ist jedoch nicht die Glühlampe, sondern die **Bogenlampe**. Auf der Naturforscherversammlung zu Genf im Jahre 1820 ließ de la Rive den Funken einer Batterie von 380 Kupfer-Zink-Elementen zwischen Kohlenspitzen überspringen. Wenn diese den richtigen Abstand voneinander hatten, so bildete der Funke einen gleichförmigen, blendend weißen Lichtbogen. Daß dabei die Verbrennung der Kohle nebensächlich ist, zeigte er dadurch, daß er den Lichtbogen im luftleeren Raume entstehen ließ. Der Lichtbogen besteht aus einer Brücke losgerissener Kohlenteilchen, die vom positiven zum negativen Pole übergeführt werden und die die Elektrizität sehr gut leiten.

Mit dem Bogenlicht wurde ein Versuch im großen Stile im folgenden Jahre von H. Davy ausgeführt. Zur Erzeugung des Stromes diente eine Batterie von 2000 Elementen, deren quadratische Kupfer- und Zinkplatten eine Seitenlänge von 2 dcm hatten. Der Strom wurde zunächst geschlossen, während sich die Kohlenspitzen berührten. Dann wurden diese voneinander entfernt, und es bildete sich der Lichtbogen zwischen ihnen. Auf diese Weise erhielt Davy einen Bogen von 8 cm Länge, aber die Kohlen verbrannten sehr schnell. Um dies zu verhindern, schloß er die Kohlen in eine Glaskugel ein und pumpte diese bis auf einen Quecksilberdruck von 6 mm aus. Jetzt verbrannten die Kohlen nicht, und der Lichtbogen erreichte in dem luftverdünnten Raume eine Länge von 18 cm.

Bedeutend verbessert wurde das Bogenlicht dadurch, daß Foucault 1844 die Holzkohle, die de la Rive und Davy benutzt hatten, durch Retortenkohle

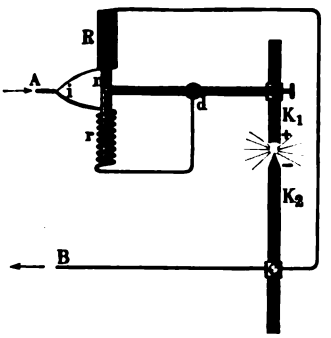
Digitized by Google

ersetzte. Diese Retortenkohle oder Gaskohle setzt sich an den inneren Wandungen der Retorten ab, in denen Steinkohlen zum Zwecke der Leuchtgasgewinnung erhitzt werden. Sie ist sehr hart, leitet die Elektrizität gut und verbrennt bei viel höherer Temperatur als Holzkohle.

Praktische Verwendung für Beleuchtungszwecke konnte die Bogenlampe erst finden, nachdem die Dynamomaschine erfunden war. Auch mußte sie selbst noch wesentlich verbessert, nämlich mit einer Vorrichtung versehen werden, durch welche der Abstand der Kohlenstäbe automatisch reguliert wird. Dies gelang erst in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunders. Das Licht ist am kräftigsten, wenn der Abstand der Kohlen gering ist. Da die Kohle aber verbrennt, müssen die Stäbe fortwährend einander genähert werden. Die positive Kohle verbrennt mehr als doppelt so schnell wie die negative. Man gibt ihr daher in der Regel einen größeren Durchmesser als dieser.

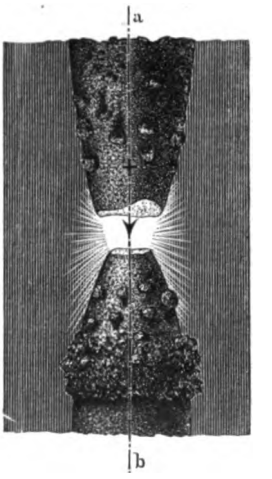
§ 393. Man hat jetzt verschiedene Arten von Bogenlampen. In Fig. 332 ist die sogenannte Differentiallampe abgebildet. Der negative Kohlen-

Fig. 332.



Differentiallampe.

Fig. 333.



Kohlenspitzen der Bogenlampe.

stab K_2 ist unbeweglich, der positive dagegen ist beweglich, indem er an dem einen Arme des Hebels befestigt ist, der sich um den Punkt d dreht. Am anderen Hebelarme ist der Eisenstab m befestigt, der oben und unten von Drahtrollen umgeben ist. Der Strom tritt bei A ein und verteilt sich auf die beiden Drahtwindungen, von denen die obere einen bedeutend größeren Widerstand hat als die untere. Welchen Weg die beiden Teile des Stromes durch die Lampe bis zur Austrittsstelle B nehmen, ist aus der Figur leicht zu ersehen. Wir wollen annehmen, der Strom werde geschlossen, während sich die Kohlen berühren. Der Strom findet dann keinen nennenswerten Widerstand, und es geht daher sozusagen kein Strom durch die obere Drahtrolle. Die Folge davon wird sein, daß der Eisenstab m nach unten gezogen wird, da der Strom in der unteren Drahtrolle (der Hauptleitung) auf m stark anziehend wirkt. Durch die Bewegung von m entfernen sich die Kohlen

Digitized by Google

voneinander und es entsteht zwischen ihnen der Lichtbogen. Wenn der Abstand der beiden Kohlen größer wird, so wird der Strom in der unteren Rolle schwächer, der Strom in der oberen Rolle dagegen stärker. Infolgedessen wird *m* nach oben gezogen und die Kohlen nähern sich wieder. Die Stromleitung in der Lampe hält so die Kohlen im richtigen Abstande. Wenn der Strom geschlossen wird, während sich die Kohlen nicht berühren, so kommt die Lampe doch in Tätigkeit. In diesem Falle geht nämlich der gesamte Strom im ersten Augenblicke durch die obere Drahtrolle. Infolgedessen wird *m* gehoben, die Kohlen kommen in Berührung und der Strom geht durch die Hauptleitung, d. h. durch die Kohlen.

Die Enden der Kohlenstäbe einer Bogenlampe nehmen beim Brennen eine eigentümliche Form an (Fig. 333 a. v. S.). Die positive Kohle nimmt die Form eines Kraters an und strahlt ein starkes Licht aus, die negative spitzt sich zu und strahlt weniger stark als die positive. Die Länge des Lichtbogens, d. h. der Abstand der Kohlen, ist bei Lampen von verschiedener Größe verschieden. Bei kleinen Lampen ist der Lichtbogen 1 mm, bei größeren bis 4 mm lang.

§ 394. Das Licht der Bogenlampe ist billiger als das Licht der Glühlampe. Die Lichtstärke von einer Normalkerze erfordert bei der Bogenlampe einen Energieverbrauch von 0,4 Watt, also ungefähr nur den siebenten Teil der Energie, welche bei der Glühlampe erforderlich ist.

Die Bogenlampe kann aber nur da verwendet werden, wo man große Lichtmengen nötig hat. Die Spannungsdifferenz an den beiden Kohlen ist, wenn die Lampe brennt, durchschnittlich 45 Volt. Man verwendet zum Betriebe der Bogenlampen Ströme von 3 bis 20 Ampère. Die den verschiedenen Stromstärken entsprechenden Lichtstärken sind aus der folgenden Tabelle zu ersehen.

Stromstärke in Ampère	3	4	5	6	7	8	9	10	12	20
Lichtstärke in Normalkerzen . .	250	360	470	580	700	830	980	1130	1450	3000

Man ersieht aus dieser Tabelle, daß das Licht um so billiger wird, je stärker der Strom wird.

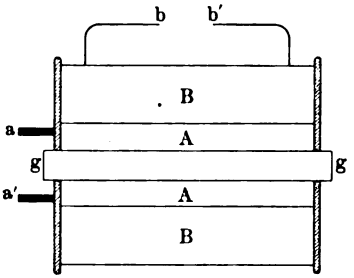
Da das meiste Licht aus dem Krater der positiven Kohle ausstrahlt, so kann die Bogenlampe eine größere Fläche nur aus einer bedeutenden Höhe beleuchten.

Digitized by Google

Elektrische Entladungen in verdünnter Luft.

§ 395. Die Länge, welche ein elektrischer Funke erreichen kann, hängt von der Spannungsdifferenz der beiden Körper ab, zwischen denen er überspringt. Zur Erzeugung hoher Spannungsdifferenzen dient ein Induktionsapparat, den man nach seinem Erfinder als Ruhmkorffschen Apparat oder auch als Funkeninduktor bezeichnet. Er besteht im wesentlichen aus denselben Teilen wie der früher (§ 379) beschriebene Apparat. Ein dicker umsponnener Kupferdraht, die primäre Leitung AA (mit den Enden a und a', Fig. 334) ist um ein Bündel Eisendrähte gewickelt. Um die Windungen AA ist ein sehr dünner und sehr gut isolierter Kupferdraht, der Induktionsdraht BB (mit den Enden b und b'), gewickelt. Bei großen Apparaten kann er eine Länge bis zu 300 Kilometer haben.

Fig. 334.



Ruhmkorffscher Apparat.

Man läßt nun durch die Windungen AA einen Strom von 5 bis 10 Ampère gehen. Der Eisenkern wird dann stark magnetisch und in den Windungen wird ein Strom induziert. Zwischen b und b' entsteht eine Spannungsdifferenz und es geht ein Funken über. — Selbstverständlich dauert die Induktion nur so lange, wie in gg eine magnetische Veränderung stattfindet. Wenn der Strom in AA unterbrochen wird, so wird der Eisenkern unmagnetisch, in BB findet von neuem Induktion statt und zwischen b und b' entsteht eine Spannungsdifferenz. Wenn der Abstand zwischen b und b' nicht zu groß ist, so springt sowohl beim Schließen als auch beim Öffnen des Stromes ein Funken über.

Die beiden Funken, der beim Schließen des Stromes und der beim Öffnen des Stromes entstehende, sind an Stärke sehr verschieden. Der letztere ist bedeutend kräftiger als der erstere. Beim Unterbrechen (Öffnen) des Stromes in AA entsteht zwischen b und b' ein viel größerer Spannungsunterschied als beim Schließen des Stromes. Dies hat seinen Grund nicht darin, daß beim Öffnen des Stromes mehr Elektrizität erzeugt wird, als beim Schließen des Stromes, sondern darin, daß der Hauptstrom beim Schließen nicht momentan seine volle Stärke erreicht. Infolgedessen erstreckt sich die induzierende Wirkung beim Schließen des Hauptstromes über eine längere Zeit, als beim Öffnen des Hauptstromes. Wenn nämlich der Hauptstrom geschlossen und geöffnet wird, so entsteht nicht nur in der

Digitized by Google

Induktionsrolle, sondern in der Hauptrolle selbst ein Induktionsstrom (Selbstinduktion). Dieser Induktionsstrom, der sogenannte Extrastrom, ist beim Schließen des Hauptstromes diesem entgegengesetzt gerichtet, beim Öffnen dagegen gleich gerichtet. Er wirkt daher im ersteren Falle auf den Hauptstrom schwächend, im letzteren dagegen verstärkend.

Wenn man dem Abstand zwischen b und b' eine geeignete Größe gibt, so springen nur die Öffnungsfunken, nicht aber die Schließungsfunken über.

Wenn nun der primäre Strom durch einen Wagnerschen Hammer geschlossen und geöffnet wird, so springen fortwährend zwischen b und b' in einer und derselben Richtung Funken über.

Ein Funkeninduktor moderner Konstruktion ist in Fig. 335 abgebildet. Der Batteriestrom tritt bei a in die Hauptspirale ein und bei b aus derselben aus. Die Enden der Induktionsspirale stehen mit den Klemmschrauben F und G in Verbindung. N ist ein Stromwender, durch den sich der Strom bequem schließen, öffnen und umkehren läßt. Der Hebel $g\,c\,s$ bildet die Unterbrechungsvorrichtung.

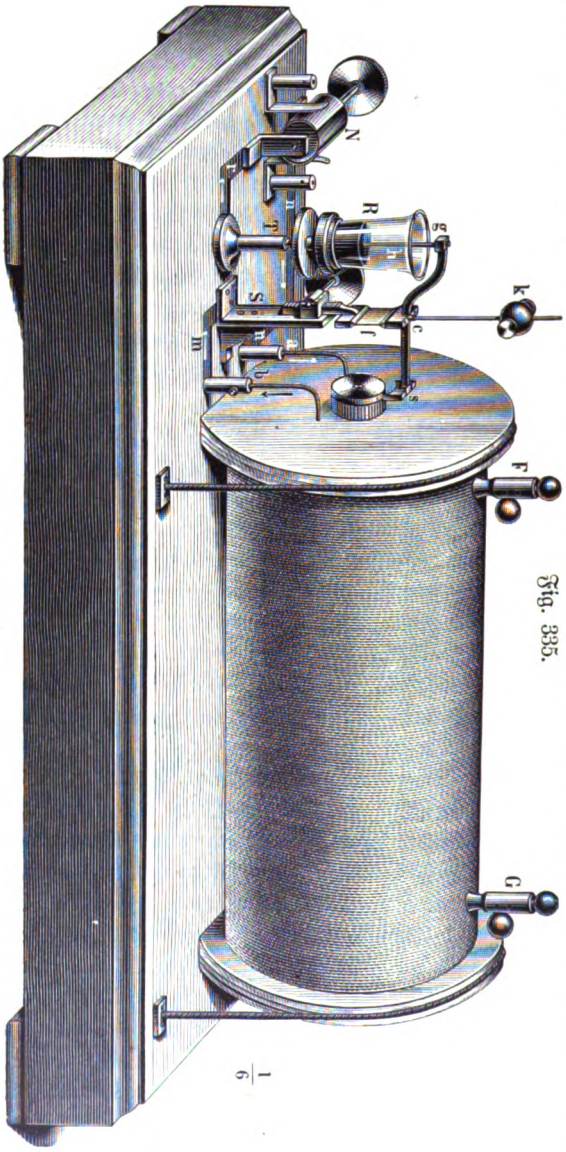


Fig. 335. Funkeninduktor.

Der Batteriestrom ist geschlossen, wenn der Metallstift h in das Quecksilber eintaucht, welches im Gefäß R enthalten ist. Sobald aber der Strom geschlossen ist, wird der Anker s vom Eisenkern der Hauptspirale angezogen.

Digitized by Google

Infolgedessen hört die Berührung zwischen *h* und dem Quecksilber auf und der Strom ist unterbrochen. Der Metallstift *h* fällt in das Quecksilber zurück und der Strom ist von neuem geschlossen u. s. w. Der vom Drehpunkt des Hebels nach oben gehende Metallstab dient dazu, durch Verschiebung der Kugel *k* die Schwingungen des Hebels zu beschleunigen oder zu verzögern.

Um die Bildung starker Funken zwischen der Eisenspitze und dem Quecksilber zu verhindern, gießt man etwas Spiritus auf das Quecksilber. Dieser leitet die Elektrizität noch schlechter als Luft.

Große Ruhmkorffsche Apparate geben Funken bis zu 50 cm Länge.

§ 396. Faraday untersuchte bereits 1838 die elektrische Entladung in verdünnter Luft und beobachtete dabei unter anderem die dunkle Entladung. *A* und *K* (Fig. 336) sind zwei in verdünnter Luft angebrachte Metallstäbe. Wenn *A* positiv und *K* negativ elektrisch gemacht wird, so entsteht an *A* ein roter Lichtnebel, der nach *K* hin gerichtet ist, ohne jedoch *K* zu erreichen. *K* selbst ist von einem bläulichen Lichtnebel umgeben. Zwischen den beiden Lichthüllen befindet sich ein dunkler Raum, durch den die Elektrizität von *A* nach *K* geht, ohne zu leuchten.

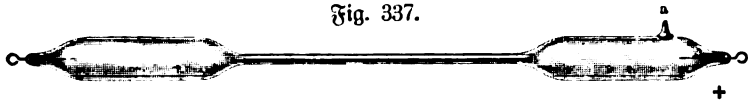
Fig. 336.

Die dunkle Entladung.

Faraday nannte das Licht am positiven Pol Anodenlicht, und das Licht am negativen Pol Kathodenlicht. Diese Bezeichnungen sind auch heute noch im Gebrauch. Es vergingen ungefähr 30 Jahre, bis die Untersuchungen Faradays von neuem aufgenommen und weitergeführt wurden.

Im Jahre 1854 wurde von Gassiot (§ 359), der umfassende Untersuchungen über den elektrischen Funken ausführte, die in Fig. 337 abgebildete

Fig. 337.



Geißlersche Röhre.

Glasröhre erfunden, die zur Beobachtung der elektrischen Entladung in verdünnter Luft dient und die später den Namen Geißlersche Röhre bekommen hat, weil sie von Dr. Geißler in Bonn in vorzüglicher Qualität fabriziert wurde. In die Enden der Röhre sind Platindrähte eingeschmolzen, die mit den Polen eines Ruhmkorffschen Apparates verbunden werden. Durch *a* wird die Luft ausgepumpt, und man kann die elektrische Entladung bei verschiedenen Graden der Luftverdünnung beobachten.

§ 397. Solange die in der Röhre eingeschlossene Luft noch die Dichtigkeit der atmosphärischen Luft hat, springt zwischen den Platindrähten der gewöhnliche elektrische Funken über. Wenn aber dann die Luft verdünnt wird, so verliert der Funken seine scharfe Form und die Röhre füllt sich mit rötlichem Licht, welches von der Anode ausgeht und bis an die blaue Lichthülle um die Kathode heranreicht. Wenn die Luft bis auf $^1/_{200}$ der ursprünglichen

Digitized by Google

Dichtigkeit verdünnt ist, füllt das rote Anodenlicht die ganze Röhre. Wenn die Verdünnung noch weiter getrieben wird, so schichtet sich das Anodenlicht, und die leuchtenden Schichten, welche durch dunkle Zwischenräume getrennt sind, ändern fortwährend die Gestalt und die Farbe. Schließlich verschwindet bei fortschreitender Verdünnung das Anodenlicht vollständig. Dagegen tritt eine ganz neue Erscheinung auf, die von der Kathode ausgeht. Bei schwacher Verdünnung ist, wie gesagt, die Kathode von einer bläulichen Lichthülle umgeben. An dieser sind drei Teile zu unterscheiden, ein dünnes Lichthäutchen unmittelbar an der Kathode, um dieses Häutchen herum eine dunkle Schicht und um diese herum wieder eine Lichthülle. Wenn sehr stark verdünnt wird, wird die dunkle Schicht im Kathodenlicht größer und größer und reicht schließlich bis an das Glas. Dieses fängt dann an, mit grünem, grüngelbem oder gelbem Licht (je nach der Beschaffenheit des Glases) zu leuchten. Mit anderen Worten, wenn die dunkle Schicht des Kathodenlichtes das Glas erreicht, fängt dieses an zu fluoreszieren (vgl. I, § 390).

Hittorf (§ 356) veröffentlichte 1869 die grundlegende Arbeit für die Untersuchung dieser Verhältnisse, die jedoch nicht die verdiente Beachtung fand. Erst 10 Jahre später wurde durch den englischen Physiker William Crookes (geb. 1832) die allgemeine Aufmerksamkeit der Physiker auf die Erscheinungen des Kathodenlichtes gelenkt. Der genannte Gelehrte faßte die Beobachtungen unter einem gemeinsamen Gesichtspunkte zusammen. Er ging von der Annahme aus, daß die starke Verdünnung der Luft zur Folge habe, daß die Luftteilchen von den Elektroden mit sehr großer Geschwindigkeit abgestoßen werden, und zwar von der Kathode mit bedeutend größerer Geschwindigkeit, als von der Anode. Die starke Verdünnung der Luft gibt den Molekülen einen bedeutend vergrößerten Raum, in dem sie sich ungehindert bewegen können. Crookes nahm an, daß die Luft im stark verdünnten Zustande ganz andere Eigenschaften habe, als bei gewöhnlicher Dichtigkeit, daß sie sich gewissermaßen in einem „vierten Aggregatzustande" befinde. Er nannte die stark verdünnte Luft, die sich in diesem Zustande befindet, strahlende Materie.

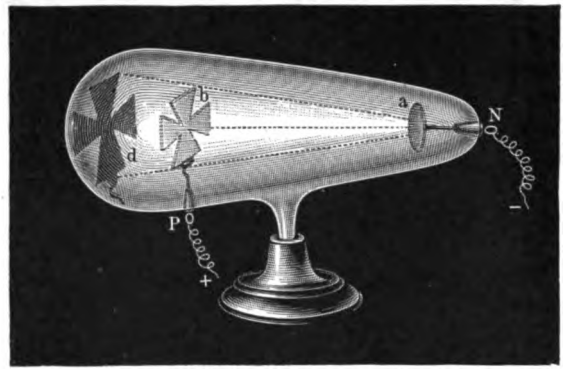
Den dunkeln Raum im Kathodenlichte bezeichnete Crookes als einen Raum, in dem sich die Luftmoleküle mit negativer Ladung von den Kathoden in geraden Linien fortbewegen, die auf den Kathoden senkrecht stehen. Hier paßt die Bezeichnung „strahlende Materie" vortrefflich. Jetzt bezeichnet man diese Strahlungserscheinung als Kathodenstrahlung.

§ 398. Die wichtigsten Eigenschaften der Kathodenstrahlen, welche von Hittorf und Crookes beobachtet wurden, sind die folgenden. Da, wo sie die Glaswand treffen, fängt das Glas an zu fluoreszieren. Ein schöner Versuch, durch den sich dies zeigen läßt, wird vermittelst des in Fig. 338 abgebildeten Apparates ausgeführt. In dem Glasgefäße ist die Luft bis auf einige Milliontel einer Atmosphäre verdünnt. Die Anode *b* hat die Form eines Kreuzes und besteht ebenso wie die Kathode aus Aluminium. Wenn *P* und *N* mit einem Ruhmkorffschen Apparate in Verbindung gesetzt werden,

Digitized by Google

so gehen von *a* Kathodenstrahlen aus und das Glas kommt in Fluoreszenz. Daß die Strahlen geradlinig fortschreiten, ersieht man aus dem auf der Glaswand entstehenden Schatten des Kreuzes. Das Kreuz ist in dem Glasgefäße so angebracht, daß es umgeklappt werden kann. Wenn dies geschieht, so verschwindet augenblicklich der Schatten. Ja, man erblickt an der Stelle, wo vorher der Schatten war, ein leuchtendes Kreuz, da die Fluoreszenz an der Stelle des Schattens stärker ist als an denjenigen Stellen, an denen das Glas schon eine Zeitlang fluoresziert hat.

Fig. 338.



Geradlinige Fortpflanzung der Kathodenstrahlen.

Die Kathodenstrahlen gehen rechtwinklig von der Oberfläche der Kathode aus, einerlei wo sich die Anode befindet. Die Kathodenstrahlen zeigen also ein ganz anderes Verhalten als die Entladung bei weniger stark verdünnter Luft. *A* und *B* (Fig. 339 a. f. S.) sind zwei Crookessche Röhren; in *A* ist die Verdünnnng $^1/_{400}$, in *B* dagegen $^1/_{1\,000\,000}$.

Die Kathode *a* besteht in beiden Röhren aus einem Hohlspiegel, und in jedem der beiden Apparate befinden sich die Anoden *b*, *c*, *d*. In *A* geht je nach der Verbindung mit dem Ruhmkorffschen Apparate ein roter Lichtstrom von *b* oder von *c* oder von *d* nach der Kathode *a*, die selbst von bläulichem Licht umgeben ist. In *B* dagegen gehen die Strahlen rechtwinklig von der hohlspiegelförmigen Kathode aus und bilden einen Strahlenkegel, der die gegenüberliegende Stelle der Glaskugel trifft, einerlei welche von den drei Anoden *b*, *c* und *d* mit dem Ruhmkorffschen Apparate verbunden ist.

Die Kathodenstrahlen üben auf die Körper, welche sie treffen, einen mechanischen Stoß aus. Ein leichtes Schaufelrädchen, dessen Achse auf gläsernen Schienen ruht (Fig. 340), kommt in Bewegung, wenn es von den Kathodenstrahlen getroffen wird.

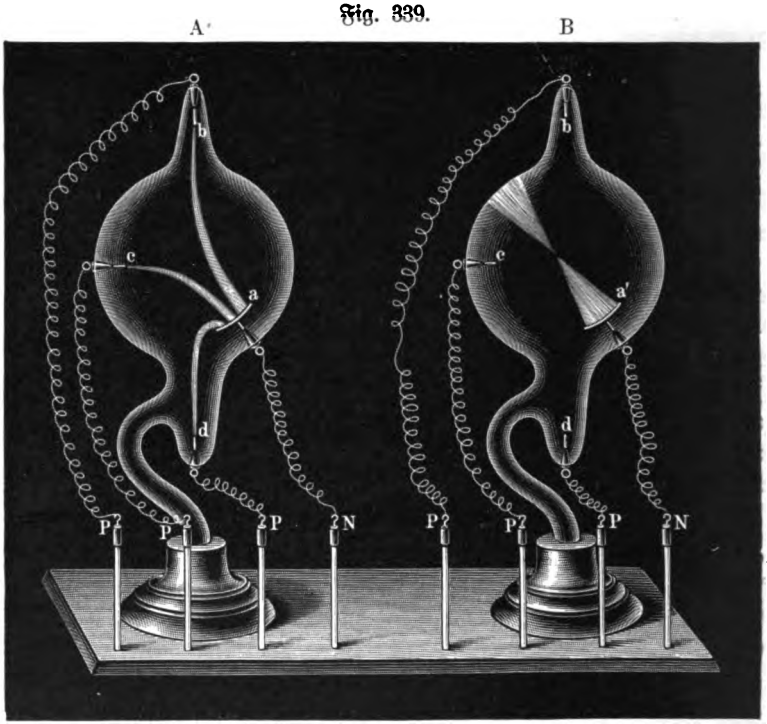
Die Kathodenstrahlen erwärmen die Körper, welche von ihnen getroffen werden. Wenn die von einer hohlspiegelförmigen Kathode ausgehenden Strahlen einen im Brennpunkte des Hohlspiegels befindlichen Platindraht treffen (Fig. 341), so wird dieser bis zum Glühen erhitzt.

Endlich mag noch erwähnt werden, daß, wie von Hittorf und Crookes beobachtet wurde, **die Kathodenstrahlen vom Magneten abgelenkt werden.** Hierdurch unterscheiden sie sich wesentlich von den Lichtstrahlen.

Digitized by Google

§ 399. An die Untersuchungen von Hittorf und Crookes schließen sich diejenigen der beiden deutschen Physiker H. Hertz und Ph. Lenard an.

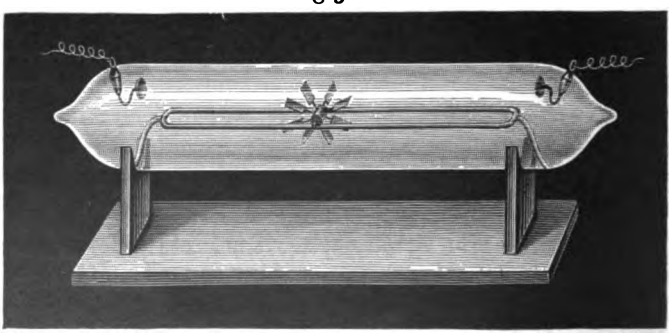
Fig. 339.



Entladung bei verschiedener Verdünnung.

Heinrich Hertz (geb. 1857 in Hamburg) studierte in Berlin und war hier Assistent bei Helmholtz. Nachdem er ein Jahr lang Privatdozent in Kiel

Fig. 340.



Mechanische Wirkung der Kathodenstrahlen.

gewesen war, wurde er 1885 Professor an der technischen Hochschule in Karlsruhe. Vier Jahre später wurde er als Nachfolger von Clausius nach Bonn

Digitized by Google

berufen. Hier starb er 1894 im Alter von nicht ganz 37 Jahren. Er zeigte durch Versuche, daß sich die elektrischen Schwingungen (vgl. § 300) im Raume als Wellen oder Strahlen elektrischer Kraft fortpflanzen, und zwar mit derselben Geschwindigkeit, mit der sich das Licht fortpflanzt. Hertz hat nachgewiesen, daß diese Strahlen ganz ebenso wie die Lichtstrahlen reflektiert, gebrochen und polarisiert werden, und anderen Forschern ist es gelungen, auch die Doppelbrechung, die Beugung und die Interferenz bei den Strahlen elektrischer Kraft nachzuweisen. Die Hertzschen Versuche bilden die experimentelle Bestätigung der von Maxwell aufgestellten elektromagnetischen Lichttheorie, der die Annahme zugrunde liegt, daß die Lichtschwingungen elektromagnetische Schwingungen sind. — Was die Kathodenstrahlen betrifft, so hat Hertz unter anderem nachgewiesen, daß diese Strahlen durch dünne Metallplatten hindurchgehen können. Der Versuch, durch den dies nachgewiesen wurde, bestand darin, daß in einer Crookesschen Röhre eine zur Hälfte mit Blattgold belegte Glasplatte so aufgestellt wurde, daß beide Hälften derselben von den Kathodenstrahlen getroffen wurden. Nicht nur der unbelegte, sondern auch der belegte Teil der Glasplatte wurde fluoreszierend, wenn er von den Strahlen getroffen wurde und wenn das Goldblättchen nicht zu dick war. Diese Entdeckung war für die weiteren Untersuchungen von großer Bedeutung, weil es durch sie ermöglicht wurde, die Kathodenstrahlen aus der Crookesschen Röhre in die äußere Luft übertreten zu lassen. Hertz forderte seinen etwas jüngeren Kollegen Lenard (damals in Heidelberg, jetzt in Kiel) auf, diese Verhältnisse näher zu untersuchen.

Fig. 341.

Wärmewirkung der Kathodenstrahlen.

Der Apparat, den Lenard bei seinen Untersuchungen benutzte, ist in Fig. 343 (a. f. S.) abgebildet. *B* ist die Kathode. Bei *F* ist die Glasröhre durch ein Aluminiumblättchen von $^1/_{400}$ mm Dicke verschlossen. *O* ist ein mit Baryumplatincyanür bestrichener Papierschirm. Dieses Salz zeigt nämlich, wie Lenard gefunden hatte, sehr starke Fluoreszenz, wenn es von Kathodenstrahlen getroffen wird.

Wenn nun der Apparat mit einem Funkeninduktor verbunden wurde, so daß *A* die Anode und *K* die Kathode bildete, so trafen die Kathodenstrahlen das Aluminiumblättchen, drangen durch dieses hindurch und erzeugten auf dem Papierschirme den Lichtfleck *O*. Der Schirm darf nicht weit von *F* entfernt sein, weil die Kathodenstrahlen sehr schnell von der Luft absorbiert

Digitized by Google

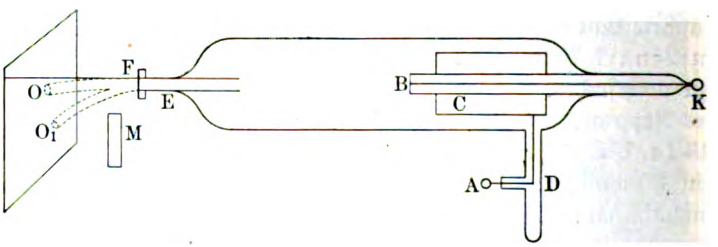
werden. Immerhin erstreckt sich die Wirkung der Strahlen bis auf eine Entfernung von 30 cm von *F*. Dies kann man daran erkennen, daß ein geladenes Elektroskop seine Elektrizität verliert, wenn der Knopf von den Strahlen getroffen wird. **Die Kathodenstrahlen machen nämlich die Luft für die Elektrizität leitend.**

Fig. 342.

Heinrich Hertz.

Lenard zeigte, daß die Kathodenstrahlen in der Luft ebenso wie im luftleeren Raume von einem Magneten abgelenkt werden. In der Figur bedeutet *M* den Magneten, welcher eine Verschiebung des Lichtfleckes von *O* nach O_1 bewirkt. Die Größe dieser Verschiebung war bei verschiedenem Grade der Verdünnung der Luft verschieden. Je stärker die Luft in der Röhre verdünnt war, desto weniger wurden die Kathodenstrahlen vom Magneten abgelenkt. Es gibt also verschiedene Arten von Kathodenstrahlen. Lenard beobachtete, daß sich zuweilen anscheinend nur ein Teil der Kathodenstrahlen ablenken ließ. Er schenkte indessen dieser Beobachtung keine besondere Aufmerksamkeit. Hätte er dies getan, so wäre es ihm vielleicht gelungen, die Entdeckung zu machen,

Fig. 343.



Versuch von Lenard.

durch die Professor W. K. Röntgen in Würzburg gegen Ende des Jahres 1895 die Welt in Erstaunen setzte.

§ 400. Röntgen (geb. 1845 in Lennep) hatte bei Versuchen mit Hittorfschen Röhren eine solche mit einer Hülle aus schwarzem Karton umgeben. Wenn er die Entladung eines Funkeninduktors durch die Röhre gehen

Digitized by Google

ließ, so zeigte ein in der Nähe aufgestellter Papierschirm, der mit Baryumplatincyanür bestrichen war, deutliche Fluoreszenz, selbst wenn der Schirm 2 m von der Röhre entfernt war. Es ging also etwas durch die Karton-

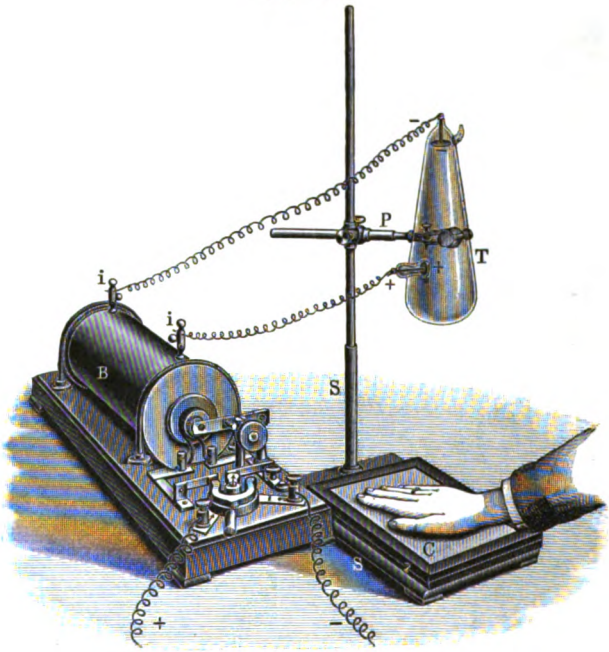
Fig. 344.

Röntgenphotographie einer Hand.

Digitized by Google

hülle hindurch, was das Platinsalz zum Fluoreszieren brachte. Kathodenstrahlen konnten es nicht sein, da diese nicht durch Karton hindurchgehen. Röntgen fand bei seinen Beobachtungen, daß die von ihm entdeckten Strahlen, die er als X-Strahlen bezeichnete, nicht nur durch dickere Papierschichten, z. B. ein Buch von 1000 Seiten, sondern auch durch mehrere Centimeter dicke Bretter, durch Aluminiumplatten bis zu 15 mm Dicke, durch Ebonitplatten und Glasplatten hindurchgehen, die zwischen der Entladungsröhre und dem Papierschirm aufgestellt werden. Er fand, daß alle Körper ohne

Fig. 345.



Photographieren mit Röntgenstrahlen.

Ausnahme für diese Strahlen durchlässig sind, wenn auch in verschiedenem Grade. Die Körper sind im allgemeinen um so weniger durchlässig, je dichter sie sind. Daß die von der Röhre ausgehende Wirkung eine Strahlung ist, wird durch die Schattenbilder bewiesen, die durch diese Wirkung erzeugt werden. Hält man die Hand zwischen die Röhre und das präparierte Papier, so entsteht auf diesem ein sogenanntes Schattenbild. Die weichen Teile der Hand schwächen nämlich die Fluoreszenz viel weniger als die Knochen. In einem solchen Schattenbilde ist der Knochenbau sehr deutlich zu erkennen (Fig. 344 a. v. S.).

Röntgen selbst warf die Frage auf, ob diese Strahlen eine Art Kathodenstrahlen seien. Er beantwortete diese Frage mit nein, weil die Kathodenstrahlen nicht, wie diese, fast ungeschwächt in die atmosphärische Luft gehen,

Digitized by Google

und weil die Kathodenstrahlen vom Magneten abgelenkt werden, während der Magnet auf die Röntgenstrahlen keinen Einfluß ausübt.

Von großer Bedeutung für die weitere Untersuchung der Röntgenstrahlen ist es gewesen, daß die gewöhnlichen photographischen Trockenplatten für diese Strahlen empfindlich sind, so daß man mit ihnen gerade so wie mit Lichtstrahlen photographieren kann. Bei photographischen Aufnahmen mit Röntgenstrahlen kann die empfindliche Platte in einer lichtdichten hölzernen Kassette eingeschlossen sein, da das Holz für die Strahlen durchlässig ist. Man hat also nicht nötig, das Zimmer zu verdunkeln, um mit Röntgenstrahlen zu photographieren. Das Photographieren mit diesen Strahlen wird durch Fig. 345 veranschaulicht. Die Kassette *C* enthält die photographische Platte.

Telegraphie und Telephonie.

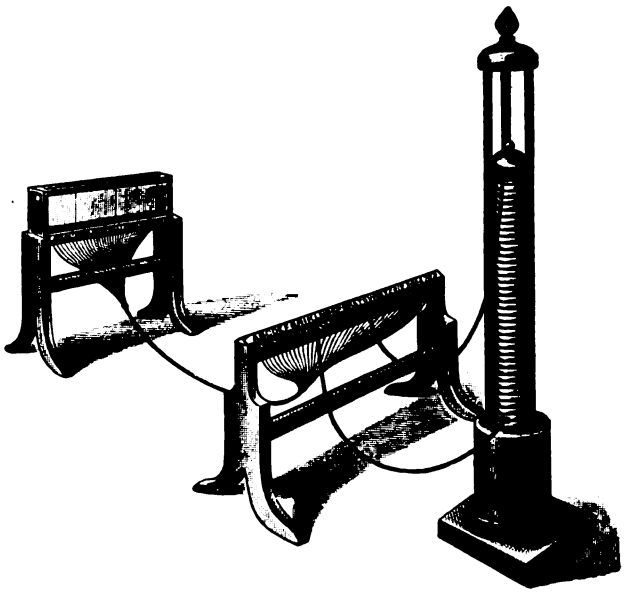
§ 401. Am Ende des 18. Jahrhunderts waren in verschiedenen Ländern die von Claude Chappe (1763 bis 1805) erfundenen optischen Telegraphen in Gebrauch. Sie bestanden aus Signalmasten mit beweglichen Armen, wie sie heute im Eisenbahnbetriebe verwendet werden. Die Buchstaben wurden durch die verschiedenen Stellungen der Arme bezeichnet. Im Jahre 1793 baute der französische Staat einen solchen Telegraphen von Paris nach Lille (30 Meilen). Die Übertragung eines Zeichens erforderte zwei Minuten und wurde durch 20 Stationen vermittelt.

Um dieselbe Zeit wurden auch die ersten Versuche gemacht, die Elektrizität zum Telegraphieren zu benutzen. Man wußte, daß sich die Elektrizität in einem Metalldrahte mit sehr großer Geschwindigkeit bewegt. Die Entladung des Konduktors einer Elektrisiermaschine oder einer Leidener Flasche hätte man also vermittelst einer Drahtleitung auf weite Entfernungen übertragen können. Von den zahlreichen Projekten kam jedoch keines zur Ausführung. Von großem Einfluß auf diese Projekte war die Erfindung der Voltaschen Säule. Sömmering (geb. 1765 in Thorn, gest. 1830 in Frankfurt a. M.) suchte die chemische Wirkung des galvanischen Stromes (Wasserzersetzung) zum Telegraphieren zu benutzen. Der von ihm konstruierte Apparat ist in Fig. 346 (a. f. S.) abgebildet. Die beiden Stationen sind durch 35 zu einem Kabel zusammengedrehte, aber gut isolierte Drähte miteinander verbunden. Der von *A* ausgehende Draht war mit *A*, der von *B* ausgehende mit *B* verbunden u. s. w. Der Strom der Voltaschen Säule konnte nun in verschiedener Weise geschlossen werden, z. B. so, daß er, wie die Figur andeutet, die Drähte *JJ* und *SS* durchlaufen mußte. Der Empfangsapparat war im wesentlichen ein Wasserzersetzungsapparat. Derselbe enthielt 35 ver-

Digitized by Google

goldete Metallspitzen, die einzeln mit den 35 Leitungsdrähten in Verbindung standen. Wenn nun der Strom vermittelst der Drähte *J J* und *S S* geschlossen wurde, so entwickelten sich an den diesen Buchstaben entsprechenden Metallspitzen Gasbläschen.

Fig. 346.



Sömmerings Telegraph.

§ 402. Praktische Verwendung hat der Sömmeringsche Telegraph nicht gefunden. Wirklich brauchbare elektrische Telegraphen zu konstruieren, gelang erst, nachdem Oersted den Elektromagnetismus entdeckt hatte. Noch in demselben Jahre, in welchem diese Entdeckung gemacht wurde (1820), schlug Ampère vor, die Wirkung des Stromes auf die Magnetnadel zur Konstruktion eines Telegraphen zu benutzen. Auch er wollte wie Sömmering, von dessen Projekt er jedoch keine Kenntnis hatte, für jeden Buchstaben einen besonderen Leitungsdraht benutzen. Jeder dieser Leitungsdrähte sollte mit einem Metallzylinder verbunden sein, und die Multiplikatornadeln sollten durch ihre Schwingungen den betreffenden Buchstaben angeben.

Ein bedeutende Verbesserung erfuhr der Nadeltelegraph durch den russischen Staatsrat von Schilling-Cannstatt (1786 bis 1837), der eine Zeitlang der russischen Gesandtschaft in München angehört und hier die Bekanntschaft Sömmerings gemacht hatte. Die Verbesserung bestand darin, daß anstatt der zahlreichen Drähte nur zwei benutzt wurden, einer zur Hinleitung und einer zur Rückleitung des Stromes. Wurde der Strom in der einen oder der entgegengesetzten Richtung geschlossen, so schlug die Nadel entweder nach rechts oder nach links aus.

Digitized by Google

Fast gleichzeitig mit Schilling-Cannstatt waren Gauß und Weber in Göttingen auf dieselbe Idee gekommen. Sie verbanden 1833 die Sternwarte und das physikalische Institut der Universität durch einen Nadeltelegraphen. Die Leitung war ungefähr ein Kilometer lang.

Die Buchstaben und die Ziffern wurden durch die folgenden Zusammenstellungen von Ausschlägen nach rechts und nach links ausgedrückt. In der folgenden Tabelle bedeutet *r* einen Ausschlag nach rechts und *l* einen Ausschlag nach links.

r = a	*lll* = h	*rlrl* = 0
l = e	*llr* = l	*rllr* = 1
rr = i	*lrl* = m	*lrrl* = 2
rl = o	*rll* = n	*lrlr* = 3
lr = u	*rrrr* = p	*llrr* = 4
ll = b	*rrrl* = r	*lllr* = 5
rrr = c (k)	*rrlr* = s	*llrl* = 6
rrl = d	*rlrr* = t	*lrll* = 7
rlr = f (v)	*lrrr* = w	*rlll* = 8
lrr = g	*rrll* = z	*llll* = 9

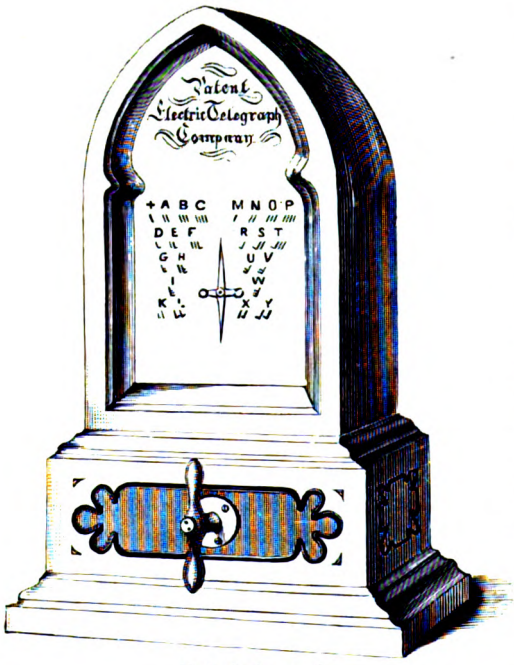
Bedeutende Verbesserungen erfuhr der Telegraph durch Professor Steinheil in München (1801 bis 1870), der 1837 zwischen München (Akademie) und Bogenhausen (Sternwarte) eine Telegraphenverbindung herstellte. Die beiden Stationen waren $^3/_4$ Meilen voneinander entfernt. Er bediente sich ebenso wie Gauß und Weber zur Hervorbringung der Zeichen der magnetelektrischen Ströme. Der Empfangsapparat war so eingerichtet, daß die Schwingungen der Magnetnadeln auf einem Papierstreifen, der durch ein Uhrwerk bewegt wurde, Punkte zeichneten, so daß Steinheil als der Erfinder des Drucktelegraphen bezeichnet werden muß. Steinheil machte ferner die wichtige Beobachtung, daß zum Telegraphieren zwischen zwei Stationen eine einzige Leitung genügt. Er benutzte bei einer seiner Telegraphenleitungen zur Rückleitung des Stromes die Eisenbahnschienen, und machte eines Tages, als das Geleis unterbrochen war, die Wahrnehmung, daß der Telegraph trotzdem benutzt werden konnte. Er zog hieraus den Schluß, daß die Rückleitung des Stromes durch die Erde bewirkt werden kann.

Weitere Verbesserungen erfuhr der Nadeltelegraph durch Wheatstone und Cooke in England, wo er noch heute in Gebrauch ist. Die äußere Ansicht eines solchen Nadeltelegraphen wird durch Fig. 347 (a. f. S.) veranschaulicht. Im Inneren des Gehäuses befindet sich in vertikaler Stellung eine Multiplikatornadel, die um eine horizontale Achse schwingt. Die sichtbare Nadel außerhalb des Gehäuses sitzt auf derselben Achse wie die Multiplikatornadel und macht daher dieselben Schwingungen wie diese. Der in der Figur (unten) sichtbare Handgriff dient zum Schließen, Öffnen und Umkehren des Stromes. Die einzelnen Teile des Apparates stehen so untereinander in Verbindung, daß die Nadel immer dieselbe Bewegung macht, welche mit dem Handgriff

Digitized by Google

ausgeführt wird. Der Buchstabe *A* wird, wie aus der Abbildung zu ersehen ist, durch zwei Ausschläge nach links, *N* durch zwei Ausschläge nach rechts, *R* durch einen Ausschlag nach links und einen Ausschlag nach rechts bezeichnet u. s. w.

Fig. 347.



Nadeltelegraph.

Eine andere Art von Telegraphen, die ebenfalls von Wheatstone erfunden wurde, ist der Zeigertelegraph. Dieser war so eingerichtet, daß durch wiederholtes Öffnen und Schließen des Stromes von einer entfernten Station aus ein Zeiger (*Z*, Fig. 348) in Bewegung gesetzt und an jeder beliebigen Stelle eines Zifferblattes, d. h. an jedem beliebigen Buchstaben und jeder beliebigen Ziffer, angehalten werden konnte. Ehe der Morsesche Drucktelegraph allgemein in Gebrauch kam, waren in verschiedenen Ländern verschiedene verbesserte Zeigertelegraphen in Gebrauch, z. B. in Deutschland der von Siemens und Halske, in Frankreich der von Breguet.

§ 403. Samuel Morse (geb. 1791 in Charlestown in Massachusetts, gest. 1872 in Newyork) widmete sich der Malerei, begab sich 1811 nach England und besuchte hier eine Malerschule. Daß er nicht ohne Talent war, kann man daraus ersehen, daß er bereits im Jahre 1813 in der königlichen Akademie in London ein großes Bild ausgestellt hatte, welches mit einer goldenen Medaille preisgekrönt wurde. Nachdem er seine Studien beendet hatte, kehrte er nach Amerika zurück, lebte hier in verschiedenen Städten, gründete in Newyork eine Malergesellschaft und gedachte sich ganz der Kunst zu widmen. Er hatte jedoch mit Schwierigkeiten zu kämpfen und mußte handwerksmäßig arbeiten, um sich seinen Unterhalt zu verdienen.

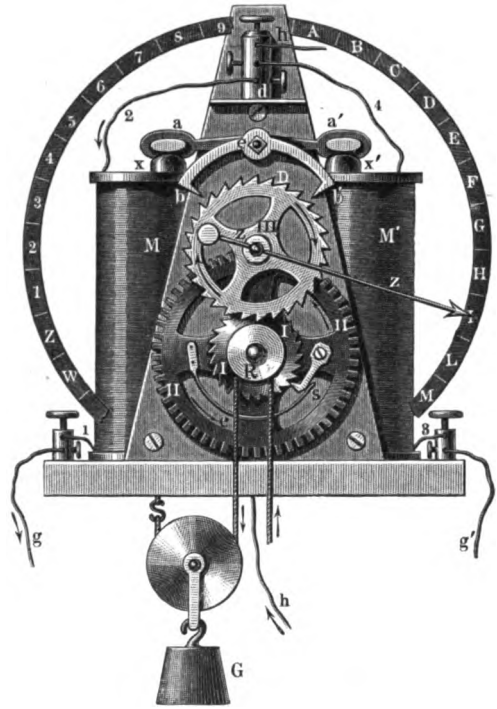
Im Winter 1826/27 hörte er eine Reihe von Vorträgen über Elektrizität. Hierdurch wurde er zu Spekulationen über die Anwendung des Elektromagnetismus angeregt. Im Jahre 1829 unternahm er eine zweite Reise nach England, um die dortigen Malerschulen kennen zu lernen. In England stand damals die Frage der elektrischen Telegraphie auf der Tagesordnung, und Morse gewann lebhaftes Interesse an derselben. Den Plan zu seinem Schreibtelegraphen entwarf er 1832 auf der Rückreise nach Amerika.

Digitized by Google

Welchen Einfluß Versuche und Pläne, die in derselben Richtung von anderer Seite angestellt wurden, auf ihn ausgeübt haben, ist schwer zu sagen. Er hat aber jedenfalls das Verdienst, dem Schreibtelegraphen eine praktisch brauchbare Form gegeben zu haben.

Die ersten von Morse konstruierten Telegraphenapparate waren etwas schwerfällig, wurden aber alsbald von ihm selbst verbessert. Die heutige Form dieser Apparate ist aus Fig. 349 u. 350 (a. f. S.) ersichtlich. Die erstere Figur stellt den Schreibapparat, die zweite den zum Schließen des Stromes dienenden „Schlüssel" oder „Taster" in $^1/_3$ der natürlichen Größe dar.

Fig. 348.



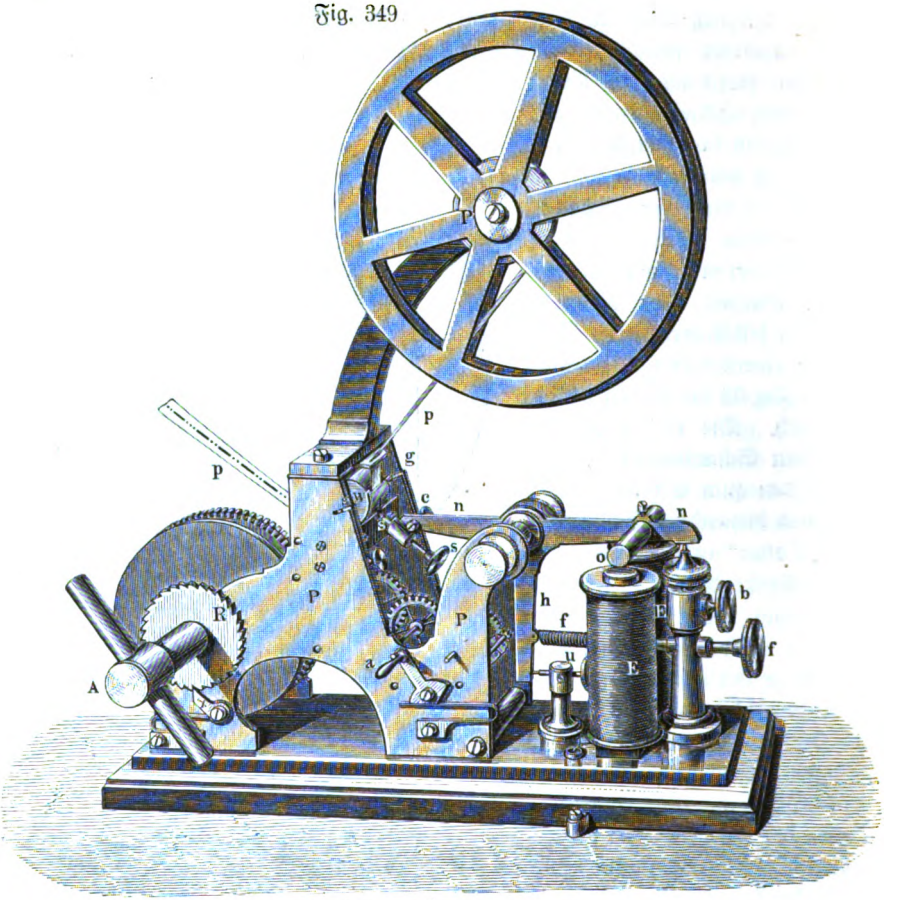
Wheatstones Zeigertelegraph.

Wenn der Strom geschlossen wird, so werden die Eisenkerne des Elektromagneten *E* magnetisch und der Anker *o* des Elektromagneten wird angezogen. Infolgedessen drückt der Stift *s* am anderen Ende des Hebels *nn* gegen einen Papierstreifen, der von zwei durch ein Uhrwerk bewegten Walzen an der Spitze des Stiftes vorübergezogen wird. Die obere Walze ist an der Stelle, wo sich der Stift befindet (in der Mitte) mit einer Rinne versehen. Der Stift bringt in dem Papierstreifen eine Vertiefung hervor, und zwar einen Punkt oder einen Strich, je nachdem der Strom nur einen Moment oder etwas länger geschlossen wird. Die Zeichen für die verschiedenen Buchstaben und Ziffern bestehen aus Kombinationen von Punkten und Strichen. Bei den Morseschen Telegraphen, wie sie jetzt in Gebrauch sind, bestehen übrigens die Zeichen nicht mehr, wie bei den älteren Apparaten, in Vertiefungen in dem Papierstreifen, sondern in farbigen Strichen und Punkten. Diese werden dadurch hervorgebracht, daß der Papierstreifen durch den Hebel an eine Farbwalze angedrückt wird.

Wie die Apparate zweier Stationen untereinander verbunden sind, ist aus Fig. 351 zu ersehen. Die Figur ist so gezeichnet, daß *A* die Station vorstellt, welche ein Telegramm abgibt, und *A'* die Station, welche das Telegramm empfängt. In der Figur bedeutet *s* den Schlüssel, *g* ein Galvano-

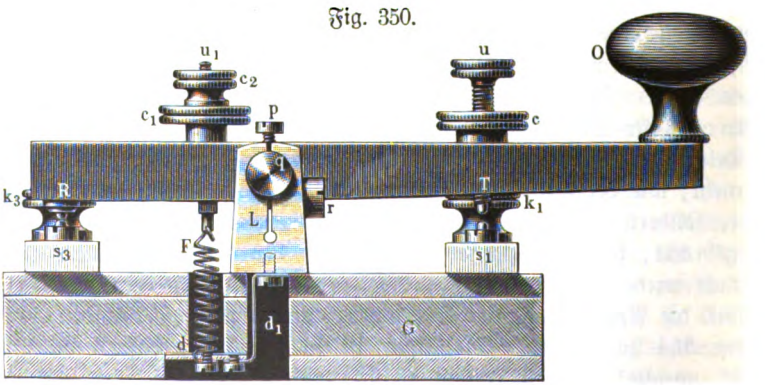
Digitized by Google

Fig. 349



Morseſcher Schreibtelegraph.

Fig. 350.

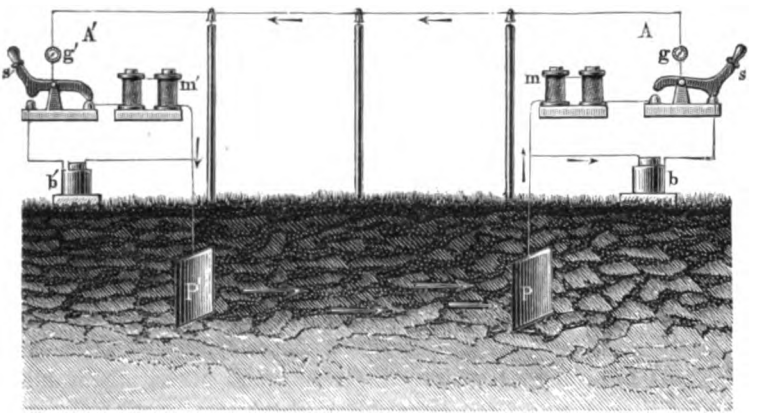


Schlüſſel zum Morſeſchen Telegraphen.

Digitized by Google

meter, *m* den Elektromagneten des Schreibapparates, *b* die Linienbatterie und *P* die Erdplatte. Durch Betrachten der Figur überzeugt man sich leicht, daß durch Niederdrücken des Tasters *s* der Strom der Batterie *b* geschlossen ist, und zwar so, daß er die Leitung und die Windungen des Elektromagneten der Empfangsstation durchlaufen muß.

Fig. 351.



Verbindung zweier Telegraphenstationen.

In den meisten Fällen geht beim Telegraphieren mit dem Schreibtelegraphen der durch die Leitung gehende Strom nicht, wie es die Figur darstellt, durch den Elektromagneten der Empfangsstation, sondern er bewirkt nur durch ein sogenanntes Relais, daß der Strom einer anderen Batterie, der sogenannten Lokalbatterie, geschlossen wird. Der Strom dieser Lokalbatterie setzt den Schreibapparat in Bewegung. Der Strom der „Linienbatterie" ist in den meisten Fällen nicht stark genug, um den Schreibapparat in Bewegung zu setzen.

Neben dem Morseschen Schreibtelegraphen ist jetzt, namentlich auf allen größeren Telegraphenstationen, der von Hughes (geb. 1831 in London) erfundene Typendrucktelegraph in Gebrauch. Er hat vor dem Morseschen Telegraphen nicht nur den Vorzug, daß er schneller arbeitet, sondern vor allen Dingen den, daß er die Depesche nicht mit Punkten und Strichen, sondern mit gewöhnlichen lateinischen Buchstaben druckt. Eine Beschreibung dieses sehr komplizierten Telegraphen kann hier nicht gegeben werden. Der Leser, welcher sich mit den Einzelheiten der Konstruktion dieses und anderer hier nicht erwähnter Telegraphen bekannt machen will, muß auf ausführliche Werke über Telegraphie verwiesen werden [1]).

Wenn Steinheil fand, daß die Erde als Stromleiter benutzt werden kann, so ist dies nicht so aufzufassen, daß wirklich ein Strom von der Erd-

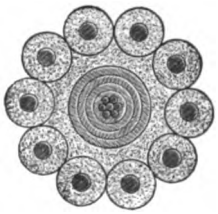
[1]) Zu empfehlen ist: Schellen, Der elektromagnetische Telegraph. Braunschweig 1888.

Digitized by Google

platte der einen Station bis zur Erdplatte der anderen Station geht. Dies ist nur bei ganz kurzen Entfernungen der Fall. Bei größeren Entfernungen wirkt die Erdplatte nur als Ableiter der Elektrizität für denjenigen Pol der Batterie, der nicht mit der Leitung in Verbindung steht.

Nicht nur bei der Konstruktion der Telegraphenapparate, sondern auch bei der Herstellung der Leitung hatte man große Schwierigkeiten zu überwinden. Auf dem Lande genügt es in der Regel, die Leitungsdrähte durch Porzellanglocken isoliert an Stangen zu befestigen. Soll aber die Leitung zwei Küsten miteinander verbinden und zu diesem Zwecke in das Wasser versenkt werden, so muß der Draht mit einer isolierenden und zugleich schützenden Hülle umgeben werden. Fig. 352 zeigt den Durchschnitt durch ein transatlantisches Kabel. Den Kern des Kabels bildet der Leitungsdraht, in der Regel nicht ein einzelner Draht, sondern ein aus mehreren Drähten zusammengedrehtes Seil. Das Seil ist in eine Guttaperchaschicht und diese in eine Schicht von geteertem Hanf eingeschlossen. Das Ganze ist mit dicken Eisendrähten umsponnen. Hierdurch erhält das Kabel die erforderliche Stärke, die es haben muß, damit es beim Versenken nicht zerreißt. Außerdem dient die Eisenhülle als Schutz gegen den Angriff der Seetiere.

Fig. 352.



Transatlantisches Kabel.

Die Zeichen, welche mit dem transatlantischen Telegraphen gegeben werden, bestehen in den Ausschlägen der Nadel eines höchst empfindlichen Galvanometers.

§ 404. Nachdem Hertz (§ 399) die elektrischen Wellen entdeckt hatte, war es ein naheliegender Gedanke, diese Wellen zur Übermittelung von elektrischen Signalen, d. h. zum Telegraphieren ohne Drahtleitung zu benutzen. Die in dieser Richtung angestellten Versuche führten jedoch erst zu praktisch verwertbaren Ergebnissen, nachdem Branly in Paris 1890 den sogenannten Kohärer (auch Fritter genannt) erfunden hatte. Dieser besteht im wesentlichen aus einer Glasröhre, die zum Teil mit Metallpulver (Silber, Nickel) gefüllt ist, welches durch zwei Metallplatten zusammengehalten wird. Das Metallpulver leitet die Elektrizität nicht. Wenn also der Kohärer in den Schließungsbogen einer Stromquelle eingeschaltet wird, so ist der Strom nicht geschlossen. Aber das Metallpulver hat die Eigenschaft, leitend zu werden, sobald es von einer elektrischen Welle getroffen wird. Man kann daher eine elektrische Welle dazu benutzen, aus der Entfernung einen Stromkreis zu schließen, und wenn in diesen Stromkreis ein Morseſcher Apparat eingeschaltet ist, so bringt dieser Zeichen hervor wie bei der gewöhnlichen Telegraphie.

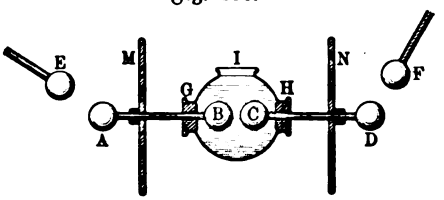
Das Telegraphieren ohne Draht besteht im wesentlichen darin, daß an der Absendestation vermittelst eines Funkeninduktors elektrische Funken erzeugt werden, die dann auf der Empfangsstation in der angegebenen Weise auf den Kohärer einwirken. Nach jedem einzelnen Zeichen muß der Kohärer, um ihn zur Aufnahme eines neuen Zeichens zu befähigen, durch einen Schlag in

Digitized by Google

den ursprünglichen Zustand versetzt, d. h. nichtleitend gemacht werden, was durch den Empfangsapparat in automatischer Weise bewirkt wird.

In Verbindung mit dem Funkeninduktor steht ein sogenannter Oszillator, d. h. eine Vorrichtung für die (oszillierende) Entladung des Induktionsapparates. Bereits Hertz benutzte bei seinen Versuchen derartige Oszillatoren. Eine für die Zwecke der Funkentelegraphie besonders zweckmäßige Form wurde von Righi in Bologna konstruiert. Die ursprüngliche Form dieses sogenannten Dreifunkenoszillators ist in Fig. 353 abgebildet. Der Funke springt zwischen den Kugeln *B* und *C* über, die von einer isolierenden Masse (Paraffinöl) umgeben sind. Die Ladung der Kugeln geschieht durch Funken, die von den Kugeln *E* und *F* auf die Kugeln *A* und *B* überspringen. Die Kugeln *E* und *F* stehen mit den Polen des Funkeninduktors in Verbindung. Als zweckmäßig für die Übertragung der Wellen hat es sich erwiesen, die eine dieser beiden Kugeln mit der Erde, die andere mit einem isoliert aufgehängten langen Draht, einer sogenannten Antenne, zu verbinden.

Fig. 353.



Dreifunkenoszillator.

Die ersten erfolgreichen Versuche mit der Telegraphie ohne Draht wurden 1897 von G. Marconi, einem Schüler Righis, ausgeführt. Es gelang ihm, vermittelst der genannten Apparate, Telegramme über den Bristolkanal (15 km) zu befördern. Heute bedient man sich der Funkentelegraphie auf Entfernungen von etwa 150 km zum Verkehr zwischen Schiffen, sowie zwischen diesen und der Küste. Marconi hat sogar durch Versuche festgestellt, daß es möglich ist, mit Hilfe der drahtlosen Telegraphie Nachrichten von England über den Atlantischen Ozean nach Nordamerika zu senden.

§ 405. Schließlich soll noch eine Art der Telegraphie erwähnt werden, die ein Verbindungsglied zwischen Telegraphie und Telephonie bildet, nämlich die Phonotelegraphie.

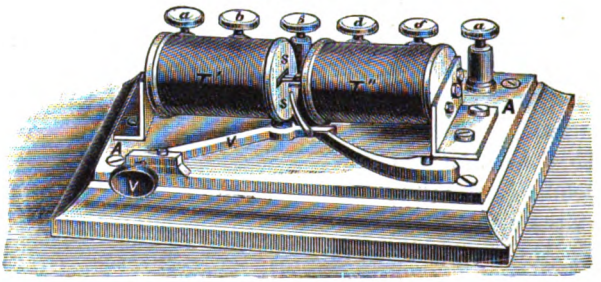
Verschiedene Physiker, unter anderen S. Yates in Dublin (1865) und Cromwell Varley in London (1870), versuchten mit Hilfe schwingender Platten oder Metallzungen regelmäßige Stromstöße durch metallische Leitungen zu senden, und Paul la Cour bildete (1875) ein vollständiges Telegraphensystem aus, bei dem regelmäßige Wellenströme verwendet wurden.

Um mehr Signale zu erhalten als die beiden, welche durch den positiven und den negativen Strom hervorgebracht werden können, machte la Cour den Strom mit Hilfe einer schwingenden Stimmgabel zu einem intermittierenden. Er stellte eine Anzahl selbstunterbrechender Stimmgabelapparate (vgl. I, § 349), deren jeder seinen bestimmten Ton hatte, so auf, daß man durch einen Druck auf einen Knopf jeden beliebigen Ton absenden konnte. Am anderen Ende der Telegraphenleitung waren Empfangsapparate an-

Digitized by Google

geschlossen, die kleine Stimmgabeln enthielten (Fig. 354), deren jede ihren bestimmten Ton hatte. Ebenso wie ein Körper, der durch seine Schwingungen einen Ton erzeugen kann, nur durch seinen eigenen Ton „sympathisch" erregt wird, so wurden auch diejenigen kleinen Stimmgabeln in Bewegung

Fig. 354.



Paul la Cours Phonotelegraph.

gesetzt, deren elektrische Töne ankamen. Die kleinen Stimmgabeln wirkten dann als Relais und jede von ihnen erregte dann ihren Lokalstrom. — Es zeigte sich, daß nicht weniger als zwölf Töne derselben Oktave in derselben Leitung wirksam sein konnten, ohne sich gegenseitig zu stören.

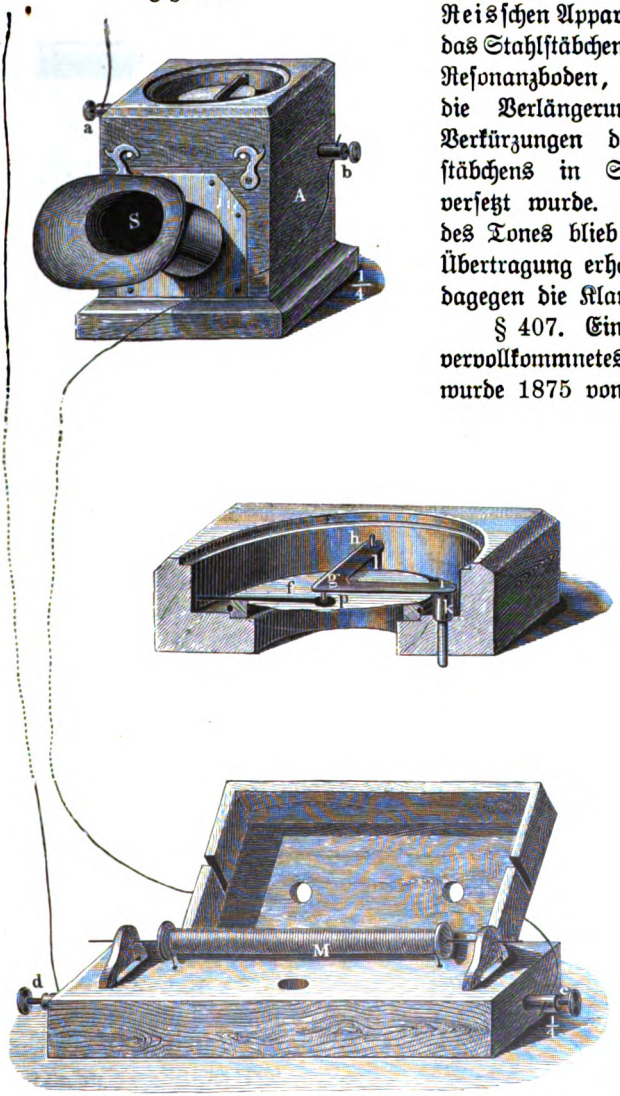
§ 406. Vermittelst des Phonotelegraphen lassen sich also Tonschwingungen von einem Orte nach einem anderen übertragen, indem die Schallwellen in intermittierenden elektrischen Strömen niedergelegt werden, deren elektromagnetische Wirkungen dann wieder eine Schallquelle in Bewegung setzen. Zusammengesetzte Klänge wie ein Musikstück oder der Klang der menschlichen Stimme lassen sich dagegen nicht durch den Phonotelegraphen übertragen. Aber es ist trotzdem gelungen, zusammengesetzte Klänge der genannten Art mit Hilfe des elektrischen Stromes zu übertragen.

Das erste elektrische Telephon wurde 1860 von Philipp Reis konstruiert. Reis war 1834 in Gelnhausen geboren und starb 1874 in Friedrichsdorf bei Homburg v. d. H., wo er seit 1858 an der Garnierschen Erziehungsanstalt als Lehrer tätig gewesen war. Der Apparat ist in Fig. 355 abgebildet. Ein hölzerner Resonanzkasten ist mit dem Mundstück S versehen und oben durch eine elastische Membran verschlossen, die in der Mitte ein Platinplättchen p trägt. Wird vor S ein Ton erzeugt, so kommt die Luft im Kasten und infolgedessen auch die Membran in Schwingungen. Unmittelbar über p sitzt eine Platinspitze an dem Hebel hgi. Wenn p in Schwingung versetzt wird, so kommt p mit der Platinspitze in Berührung, und durch diese Berührung wird der Stromkreis einer Batterie geschlossen. In demselben Takte, in welchem p schwingt, wird der Strom fortwährend geschlossen und wieder unterbrochen. Der Strom durchläuft nun die Spirale M, und in dieser liegt ein Stahlstäbchen. Dieses wird im Takte der Stromstöße, folglich im Takte der in den Resonanzkasten eintretenden Schallwellen

Digitized by Google

abwechſelnd magnetiſch und unmagnetiſch. Wenn es aber magnetiſch wird, verlängert es ſich etwas, und wenn es wieder unmagnetiſch wird, ſo verkürzt es ſich wieder. Dieſe Erſcheinung war bereits ſeit dem Jahre 1837 bekannt (vergl. § 223). Bei dem Reisſchen Apparat lag nun das Stahlſtäbchen auf einem Reſonanzboden, der durch die Verlängerungen und Verkürzungen des Stahlſtäbchens in Schwingung verſetzt wurde. Die Höhe des Tones blieb bei dieſer Übertragung erhalten, nicht dagegen die Klangfarbe.

Fig. 355.



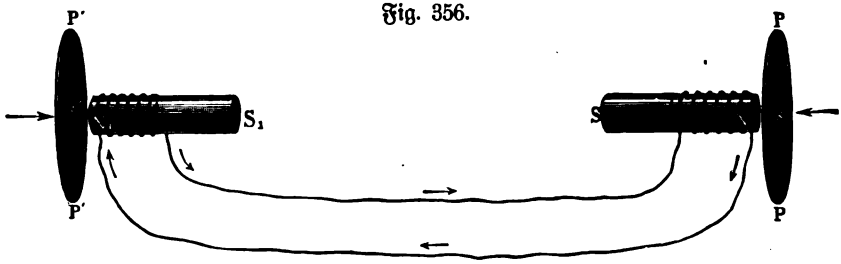
Das Reisſche Telephon.

§ 407. Ein bedeutend vervollkommnetes Telephon wurde 1875 von Graham Bell (geb. 1847 in Edinburg) konſtruiert. Bell war Profeſſor der Phyſiologie der Sprachwerkzeuge in Boſton und hatte Erfahrung in phonetiſchen Unterſuchungen. Er ließ die Schallwellen auf eine dünne Stahlplatte *s* (Fig. 356)

Digitized by Google

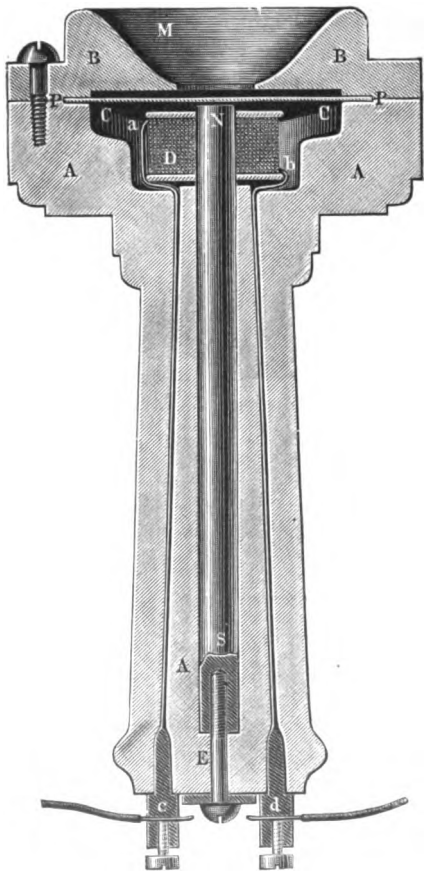
wirken, die dem einen Pol des Magneten NS gegenübersteht. Durch die Schwingungen der Stahlplatte wird die Stärke des Magnetpols geändert, und

Fig. 356.



Bells Telephon.

Fig. 357.



Bells Telephon.

eine Folge davon ist, daß in der Drahtrolle D (Fig. 357) Induktionsströme entstehen. Diese Induktionsströme laufen durch die Drahtleitung nach der anderen Station und hier durch die zweite Drahtrolle, so daß sich die Stärke des Magneten $N_1 S_1$ der Stromstärke entsprechend ändert. Dies hat zur Folge, daß die dünne Stahlplatte s' in Schwingung kommt und Schallwellen erzeugt, und zwar genau dieselben Schallwellen, durch welche die Stahlplatte s in Schwingung versetzt wurde. Hält man daher das Ohr vor s', so hört man die Worte, welche auf der anderen Station in den Apparat hineingesprochen werden.

Das Bellsche Telephon hat den Mangel, daß es die Töne nur sehr schwach wiedergibt. Für größere Entfernungen ist es daher nicht zu brauchen.

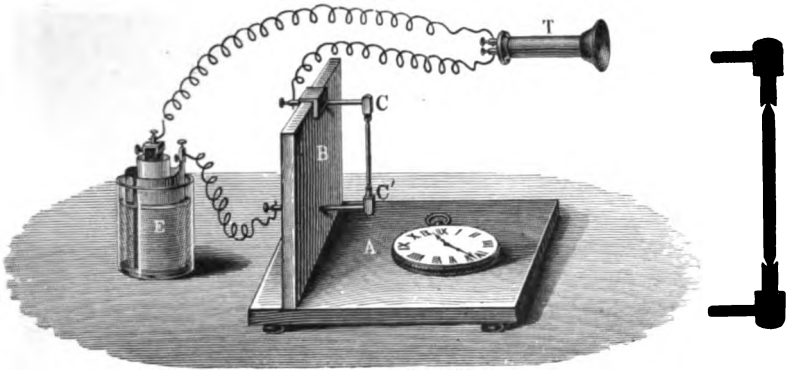
§ 408. Der Gebrauch des Telephons für größere Entfernungen wurde erst durch die Einführung des Mikrophons ermöglicht. Das Bellsche Telephon dient dann nur noch als Hörapparat.

Das Mikrophon wird gewöhnlich als eine Erfindung von Hughes bezeichnet. Es muß jedoch als Abänderung eines Bestandteils von Edisons sogenanntem Kohlentelephon bezeichnet werden.

Digitized by Google

Die Einrichtung des Hughesschen Mikrophons, durch welches die schwachen Töne des Bellschen Telephons bedeutend verstärkt werden, ist aus Fig. 358 ersichtlich. Zwischen den beiden Kohlenstücken C und C' sitzt lose ein an

Fig. 358.



Mikrophon.

beiden Enden zugespitztes Kohlenstäbchen. Der Strom des Elementes E ist so geschlossen, daß er das Kohlenstäbchen und die Drahtwindung des Telephons T durchlaufen muß. Wenn nun die Platte A erschüttert wird, so bewegt sich das Kohlenstäbchen ein wenig. Dies hat eine merkliche Änderung der Stromstärke zur Folge und das Telephon „spricht". Das Ticken einer Taschenuhr hört man im Telephon bedeutend verstärkt. Ja, wenn eine Fliege über die Platte A läuft, so macht sich dies im Telephon als ein deutlich wahrnehmbares Geräusch bemerkbar.

Digitized by Google

Digitized by Google

Das Wetter.

Digitized by Google

Digitized by Google

Bis zur Erfindung des Barometers.

§ 409. Es gibt wohl keinen Ort auf der Erde, an dem das Wetter nicht mehr oder weniger bedeutenden Veränderungen unterworfen ist. Aber diese Veränderungen sind nicht so regelmäßig wie die Veränderungen, welche man an der Sonne, am Mond und an den Sternen beobachtet. Da jedoch das Wetter für den Menschen von großer Bedeutung ist, so hat man zu allen Zeiten versucht, das Wetter vorauszusagen.

Ein Mittel dazu glaubte man in den Himmelskörpern selbst zu haben. Wenn diese über das Schicksal des Menschen, über Krieg, Pest und andere irdische Dinge Auskunft geben konnten, so mußten sie natürlich auch über das Auskunft geben können, was vom Himmel selbst kommt. Überreste dieses Aberglaubens sind vielleicht Regeln wie die, daß es Regen bedeutet, wenn der Mond „tropft", d. h. wenn der schalenförmige Mond den Boden schräg nach oben wendet.

§ 410. Man ist leicht geneigt, zwischen zwei Erscheinungen, die gleichzeitig beobachtet werden, einen Zusammenhang zu vermuten. Wenn man nun ein solches gleichzeitiges Auftreten wiederholt beobachtet, so wird man in dieser Vermutung bestärkt, und das Zufällige wird als eine Gesetzmäßigkeit angesehen. Anderseits gibt es viele, die die Ausnahmen von der Regel übersehen oder, wenn sie dieselben beobachten, sich damit beruhigen, daß es keine Regel ohne Ausnahme gibt. Man findet daher überall eine Menge von Wetterregeln, von denen einige einen wirklichen Zusammenhang zwischen den Naturerscheinungen zum Ausdruck bringen, während andere jeder sachlichen Begründung entbehren, wie die erwähnte vom Tropfen des Mondes. Eine andere Regel, die früher vielfach zur Vorausbestimmung des Wetters während des Sommers benutzt worden ist und vielleicht an manchen Orten noch jetzt benutzt wird, ist die folgende: „Ebenso wie die Schneetage im Winter in bezug auf Mariä Lichtmeß (2. Februar) fallen, fallen die Regentage im folgenden Sommer in bezug auf den Johannistag (24. Juni). Wenn es am 31. Januar schneit, so regnet es am 22. Juni u. s. w."

§ 411. Derartigen wertlosen Wetterprophezeiungen lassen sich jedoch auch andere gegenüberstellen, die in der Natur der Sache begründet sind. Es gibt zahlreiche Menschen, namentlich unter den älteren Landbewohnern, die,

Digitized by Google

auf langjährige Erfahrung gestützt, das Wetter mehr oder weniger sicher voraussagen können.

Wir besitzen eine 300 Jahre alte Sammlung von Wetterregeln, die auf Veranlassung Tycho Brahes von einem seiner Schüler, Peder Jakobsen Flemlöse (1554 bis 1599) verfaßt worden ist. Dieser hatte Medizin studiert, aber es wurde ihm vom König Friedrich II. die Ernennung zum Kanonikus in Aussicht gestellt, wenn er zunächst Tycho Brahe bei seinen astronomischen Beobachtungen unterstützen würde. Er war 10 Jahre auf Hveen, kam dann als Arzt des Stadthalters nach Norwegen und bekam 1590 das versprochene Kanonikat in Roskilde. Tycho Brahe ließ Flemlöses Werk 1591 in seiner eigenen Druckerei drucken, nachdem er Longomontanus ein Vorwort zu dem Werke diktiert hatte. Der Titel des Buches lautet: „En Elementisch og Jordish Astrologia Om Lufftens forendring“ (Elementische und irdische Astrologie über die Veränderung der Luft). Allein sowohl aus dem Vorwort, als auch aus dem Inhalte des Buches geht hervor, daß es sich hier nicht um Astrologie im alten Sinne des Wortes handelt. Es wird darauf hingewiesen, daß die Sinne der Tiere von dem Zustande des Wetters beeinflußt werden und daß die Tiere dies durch ihr Verhalten zu erkennen geben. Der Mensch wird vom Zustande der Luft nicht so stark beeinflußt, aber er kann aus dem, was er sieht, seine Schlüsse ziehen. Tycho Brahe zieht daher diese Regeln dem Versuche vor, das Wetter aus der Stellung der Sterne vorauszusagen, weil sie zuverlässiger und für jedermann leicht zu verstehen sind.

Eine neue Auflage des Buches mit einer Vorrede von Longomontanus erschien im Jahre 1644. Spätere Neudrucke erschienen 1745 und 1865. Das Buch umfaßt sechs Teile mit zusammen 399 Artikeln. Es behandelt die Anzeichen von trockenem und klarem Wetter, von Kälte, Schnee, Hagel, Reif, trübem Wetter und Tau, von Regen und Sturm, Gewitter, Erdbeben, von Fruchtbarkeit und Mißwachs. Die Anzeichen werden von dem Aussehen der Sonne, des Mondes und der Sterne hergenommen, von dem Aussehen der Luft und des Meeres, von irdischen Erscheinungen (Flammen), von den Bewegungen und dem Aussehen von Tieren und Pflanzen, von der Art und Weise, wie sich das Wetter anläßt zu wechseln u. s. w. Selbst der sechste Teil, welcher von Fruchtbarkeit und Mißwachs handelt, ist durchaus sachlich gehalten. Da heißt es z. B. Art. 377: „Viel Schnee zur rechten Zeit und zeitiger Frost im Winter bekommt der Saat gut, so daß sie in der Regel reichen Ertrag bringt“, oder Art. 385: „Häufiger Nachtfrost und Reif im Frühjahr und Sommer ist nicht nur für die Entwickelung des Getreides, sondern auch für das Gedeihen der Blumen auf den Äckern, in den Gärten und in den Wäldern schädlich.“ Flemlöses Buch hat 300 Jahre lang vielen, die sich in seine Ideen einarbeiten wollten, ausgezeichnete Dienste geleistet. Ja auch heute noch können wir von dem alten Meister lernen, wenn wir auch gewohnt sind, uns bei unseren Wetterprophezeiungen mehr an die Angaben meteorologischer Instrumente zu halten.

Digitized by Google

§ 412. Nicht weniger interessant ist es, daß Tycho Brahe neben seinen astronomischen Aufzeichnungen auf Hveen von 1582 bis 1597 ein meteorologisches Tagebuch führen ließ. Es hat in der Hofbibliothek in Wien als Manuskript gelegen, bis es 1876 von der Gesellschaft der Wissenschaften in Kopenhagen bearbeitet und veröffentlicht wurde. Obgleich die Beobachtungen ohne Anwendung von Instrumenten gemacht worden sind, hat man aus ihnen doch den Schluß ziehen können, daß viele Wetterverhältnisse damals dieselben waren wie jetzt. So zeigt sich eine große Übereinstimmung in der Größe der Wolkendecke in den verschiedenen Monaten, ebenso in der Häufigkeit von Regen, Schnee, Hagel, Nebel und Gewittern. Ja aus dem Tagebuch T. Brahes geht hervor, daß damals ebenso wie heute gewisse Tage des Jahres (z. B. der 15. Januar) zu kaltem, andere dagegen (z. B. der 8. Januar) zu mildem Wetter neigten.

Meteorologische Instrumente.

§ 413. Nach der Erfindung des Barometers erkannte man bald, daß der Luftdruck einen bedeutenden Einfluß auf das Wetter ausübt, und sowohl das Barometer als auch das Thermometer wurden bereits im 17. Jahrhundert, in welchem sie erfunden wurden, an verschiedenen Orten regelmäßig beobachtet. In Florenz z. B. wurden auf Veranlassung des Großherzogs regelmäßige Wetterbeobachtungen ausgeführt, die sich auf den Luftdruck, die Temperatur, die Windrichtung und die Himmelsansicht erstreckten. Diese Beobachtungen hatten jedoch nicht ohne weiteres zur Folge, daß neue Beziehungen zwischen den Naturerscheinungen bekannt wurden. Erst mußten die Instrumente verbessert und langjährige Beobachtungen gesammelt werden, bevor man aus den Ergebnissen dieser Beobachtungen sichere Schlüsse ziehen konnte. Über die Entwickelung der Instrumente ist folgendes hervorzuheben.

§ 414. Hooke (I, § 166) konstruierte das Radbarometer, an welchem sich die Schwankungen des Luftdruckes bequemer beobachten lassen, als am gewöhnlichen Barometer. Bei diesem Instrument (Fig. 359 und 360 a. f. S.) schwimmt auf der Oberfläche des Quecksilbers im offenen Schenkel ein eisernes Gewicht. Die Bewegungen des Gewichtes werden in der aus Fig. 360 ersichtlichen Weise vermittelst einer Zahnstange und eines Zahnrades auf einen Zeiger übertragen. Durch diese Übertragung wird eine bedeutende Vergrößerung der Bewegung erzielt.

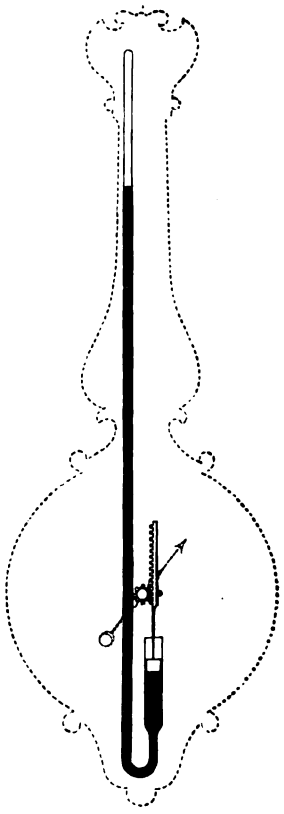
Huygens (I, § 161) ist der Erfinder des Doppelbarometers (Fig. 361, S. 459). Das offene Gefäß dieses Barometers ist von zylindrischer Gestalt und verlängert sich in ein enges offenes Rohr, in welchem sich gefärbter

Digitized by Google

Spiritus befindet. Das geschlossene Rohr des Barometers endet mit einer Erweiterung von ähnlicher Form wie die untere. Eine geringe Veränderung im Stande des Queckſilbers hat eine große Änderung in der Stellung des oberen Endes der Spiritusſäule zur Folge. Das Sinken der Spiritusſäule

Fig. 359.

Fig. 360.



Hookes Radbarometer.

entſpricht natürlich dem Steigen des Barometers, alſo dem Zunehmen des Luftdruckes.

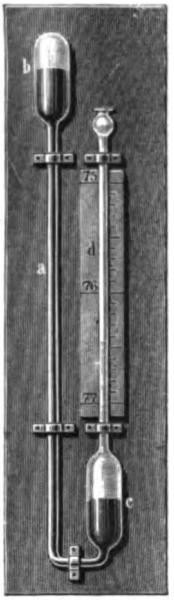
Außer dieſen Queckſilberbarometern wurden von verſchiedenen Mechanikern ſog. Aneroidbarometer, d. h. Barometer ohne Flüſſigkeit, konſtruiert. Es gibt mehrere Arten dieſer Barometer. Sie enthalten ſämtlich ein luftleeres elaſtiſches Metallgefäß, welches um ſo mehr zuſammengedrückt wird, je höher der Luftdruck ſteigt. Bei dem in Fig. 362 abgebildeten Inſtrument hat das Gefäß die Geſtalt eines offenen Ringes. Wenn der Luftdruck ſteigt, ſo wird die Krümmung des Ringes ſtärker, d. h. die Enden desſelben nähern ſich. Dieſe Bewegung wird vermittelſt eines Hebels und zweier Zahnräder auf einen Zeiger übertragen. Dieſe Inſtrumente haben den Vorzug, daß ſie ſehr

Digitized by Google

bequem zu transportieren sind. Sie eignen sich daher sehr gut zu Höhenbestimmungen (I, § 262).

§ 415. Für genaue Messungen eignet sich jedoch am besten ein Quecksilberbarometer, welches so eingerichtet ist, daß der Nullpunkt der Teilung auf die

Fig. 361.

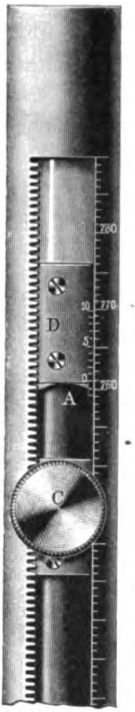


Doppelbarometer.

Fig. 362.

Aneroidbarometer.

Fig. 363.



Ableſevorrichtung am Barometer.

Höhe des Queckſilbers im offenen Schenkel eingeſtellt und die Teilung vermittelſt eines Nonius abgeleſen werden kann.

Dies läßt ſich in verſchiedener Weiſe bewerkſtelligen. Bei der in Fig. 363 abgebildeten Vorrichtung beſteht der Maßſtab aus einem Meſſingrohr, welches unten mit einer Elfenbeinſpitze endet, die den Nullpunkt der Teilung bildet und ſo eingeſtellt werden kann, daß ſie die Oberfläche des Queckſilbers berührt. Weiter oben iſt das Meſſingrohr durchbrochen, ſo daß man die Oberfläche des Queckſilbers ſehen kann. Zur genauen Ableſung dient der am Rande des Schiebers *D* angebrachte Nonius. Bevor man ablieſt, ſtellt man den unteren Rand des Schiebers auf die Spitze des Queckſilbers ein. Die Figur zeigt einen Barometerſtand von 760,8 mm.

Dem Werte des Barometerſtandes, wie er direkt abgeleſen wird, haftet immer ein Fehler an, weil das Queckſilber bei verſchiedenen Temperaturen verſchiedene Dichtigkeit hat. Um die Barometerſtände von dieſem Fehler zu befreien, rechnet man ſie ſo um, als ob die Beobachtungen immer mit Queck-

Digitized by Google

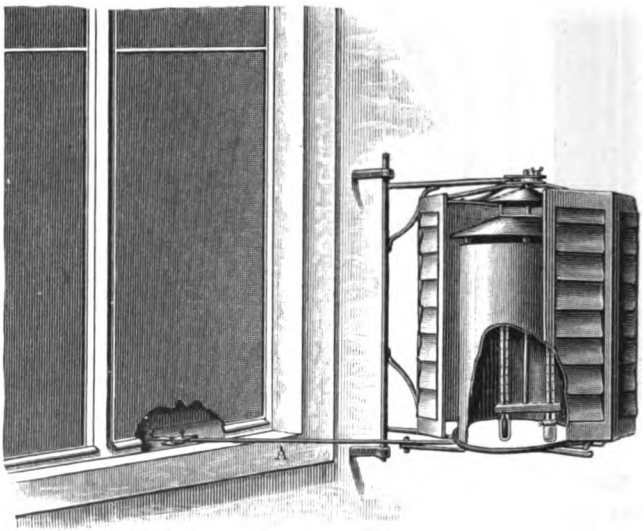
silber von 0° gemacht worden wären. Diese „Reduktion“ des Barometerstandes auf 0° geschieht vermittelst der Formel

$$b_o = b_t(1 - t\alpha),$$

in welcher b_o den Barometerstand bei 0°, b_t den Barometerstand bei t°, t die Temperatur, bei welcher der Barometerstand abgelesen wurde, und α den Ausdehnungskoeffizienten des Quecksilbers (0,000 181) bedeutet. Bei regelmäßigen Beobachtungen führt man die Korrektion vermittelst einer nach der Formel angefertigten Tabelle aus.

Der Barometerstand ist, wie wir wissen, in hohem Grade von der Höhe des Beobachtungsortes über dem Meeresspiegel abhängig. Für gewisse Zwecke

Fig. 364.



Thermometergehäuse.

(Wetterkarten) muß der Barometerstand auf den Meeresspiegel reduziert werden. Wenn der Beobachtungsort nicht sehr hoch über dem Meeresspiegel liegt, so beträgt diese Berichtigung des Barometerstandes für je 10,5 m 1 mm (I, § 261). Bei größeren Höhen muß die Korrektion durch Rechnung oder mit Hilfe einer Tabelle vorgenommen werden.

§ 416. Die Einrichtung und Entwickelung des Thermometers ist bereits in den § 10 bis 26 beschrieben worden. Es dauerte lange, bis man verstand, wie es angebracht werden muß, wenn es die Temperatur der Luft richtig anzeigen soll. Man glaubte, die Temperatur der Luft richtig zu erhalten, wenn man zwei Thermometer beobachtete, von denen das eine an der Nordseite und das andere an der Südseite des Hauses angebracht war, und dann den Durchschnitt der Angaben beider Thermometer nahm. Erst nachdem man die Gesetze der Wärmestrahlung erkannt hatte, wurde man sich klar darüber, wie ein Thermo-

Digitized by Google

meter angebracht werden muß, damit es die Lufttemperatur richtig anzeigt. Das Thermometer muß in freier Luft hängen, aber so, daß es vor Wärmestrahlung und vor Regen geschützt ist. Dies erreicht man dadurch, daß man das Thermometer in einem Gehäuse mit Jalousiewänden aufhängt (Fig. 364). Das Gehäuse wird am besten in einer Höhe von 2 bis 3 m an der Nordseite des Hauses angebracht.

§ 417. Die Menge Wasserdampf, die in einem gewissen Raum enthalten sein kann, hängt, wie wir gesehen haben (§ 86), nicht von der in dem Raume enthaltenen Menge Luft, sondern nur von der Temperatur ab. Wenn ein Raum soviel Wasserdampf enthält, als er bei der herrschenden Temperatur enthalten kann, so ist der Raum mit Wasserdampf gesättigt oder mit gesättigtem Dampf angefüllt (§ 81). Dieser Dampf übt dann einen gewissen Druck aus, einerlei ob außer dem Dampf noch Luft vorhanden ist oder nicht. Der Druck ist, in Millimetern Quecksilber angegeben, bei verschiedenen Temperaturen t der folgende:

t	mm	t	mm	t	mm	t	mm
— 30°	0,6	— 14°	1,5	2°	5,3	18°	15,4
— 29	0,6	— 13	1,6	3	5,7	19	16,3
— 28	0,6	— 12	1,8	4	6,1	20	17,4
— 27	0,6	— 11	1,9	5	6,5	21	18,5
— 26	0,7	— 10	2,1	6	7,0	22	19,7
— 25	0,7	— 9	2,3	7	7,5	23	20,9
— 24	0,7	— 8	2,5	8	8,0	24	22,2
— 23	0,7	— 7	2,7	9	8,6	25	23,6
— 22	0,8	— 6	2,9	10	9,2	26	25,0
— 21	0,8	— 5	3,1	11	9,8	27	26,3
— 20	0,9	— 4	3,4	12	10,5	28	28,1
— 19	1,0	— 3	3,7	13	11,2	29	29,8
— 18	1,1	— 2	4,0	14	11,9	30	31,6
— 17	1,2	— 1	4,3	15	12,7		
— 16	1,3	0	4,6	16	13,5		
— 15	1,4	1	4,9	17	14,4		

Wenn man wissen will, welche Dampfmengen diesen verschiedenen Drucken entsprechen, so kann man für jedes Millimeter Druck 1,06 Gramm Dampf im Cubikmeter rechnen.

§ 418. Wenn die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist und man kennt die Temperatur der Luft, so findet man mit Hilfe der Tabelle leicht die Menge des Wasserdampfes. Wenn die Luft nicht mit Dampf gesättigt ist, so kann man die in der Luft enthaltene Dampfmenge oder die Feuchtigkeit der Luft in drei verschiedenen Arten angeben.

a) Relative Feuchtigkeit. Man kann das Verhältnis der wirklich vorhandenen Menge Dampf zu derjenigen Menge angeben, mit der die Luft bei der herrschenden Temperatur gesättigt sein würde. Die relative Feuchtig-

Digitized by Google

keit wird in der Regel in Prozenten ausgedrückt. Ist z. B. bei 16° der Dampfdruck nur 8,1 mm, während er 13,5 mm sein könnte, so ist die relative Feuchtigkeit 8,1 : 13,5 = 60 Proz.

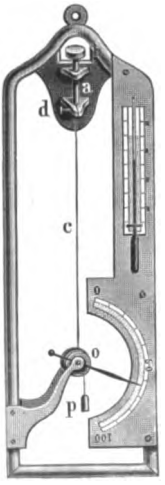
b) Absolute Feuchtigkeit. Man kann einfach die wirklich vorhandene Dampfmenge oder den entsprechenden Druck angeben.

c) Man kann den Taupunkt angeben, d. h. diejenige Temperatur, bei welcher die Luft mit der wirklich vorhandenen Dampfmenge gesättigt sein würde. In dem vorliegenden Beispiel würde der Taupunkt $8^1/_6°$ sein, d. h. wenn die Luft ohne Änderung der Feuchtigkeit bis auf diese Temperatur abgekühlt würde, so würde der Wasserdampf anfangen, sich in Form von Tau auszuscheiden.

§ 419. Der Feuchtigkeitsgehalt der Luft läßt sich in verschiedener Weise ermitteln. Es gibt gewisse Tier- und Pflanzenstoffe, welche die Eigenschaft besitzen, je nach dem Grade der Feuchtigkeit sich zusammenzuziehen oder auszudehnen. Zu diesen sogenannten hygroskopischen Substanzen gehören z. B. Haare, Darmsaiten und die Griffel gewisser Storchschnabelarten. Es gibt zahlreiche billige, aber auch ziemlich unzuverlässige „Wetterpropheten", die auf dem Verhalten hygroskopischer Substanzen beruhen.

Das beste von derartigen Instrumenten ist das von H. B. Saussure, Professor in Genf (geb. 1740, gest. 1799), konstruierte Haarhygrometer (Fig. 365). Der hygroskopische Teil des Instrumentes ist ein Menschenhaar, welches oben befestigt und unten um eine Achse gewunden ist. Durch ein an der Achse wirkendes kleines Gewicht wird es im gespannten Zustande erhalten. Ein an der Achse befestigter Zeiger zeigt je nach dem Feuchtigkeitsgehalt der Luft verschiedene Grade einer Teilung, die in der Weise hergestellt wird, daß man das Instrument in vollkommen trockene Luft und in vollkommen mit Dampf gesättigte Luft stellt und den Abstand der beiden entsprechenden Stellungen des Zeigers in 100 Teile teilt. Das Instrument kann natürlich nicht zur Ermittelung der absoluten Feuchtigkeit dienen.

Fig. 365.



Haarhygrometer.

§ 420. Um die absolute Feuchtigkeit zu ermitteln, kann man eine bestimmte Menge Luft durch ein mit Chlorcalcium gefülltes Rohr saugen. Die Gewichtszunahme, welche das Rohr erleidet, gibt die Menge des in dem betreffenden Luftvolum enthaltenen Wasserdampfes an. Das Verfahren ist sicher, aber zeitraubend.

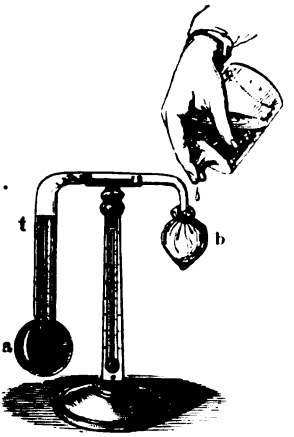
Ein anderes Verfahren, die absolute Feuchtigkeit der Luft zu ermitteln, besteht darin, daß man einen blanken Gegenstand abkühlt, bis er sich mit Tau beschlägt, und die Temperatur abliest, bei der dies geschieht. Diese Temperatur ist der Taupunkt. Die Einrichtung des Daniellschen Hygrometers ist aus Fig. 366 ersichtlich. Die in der Kugel *a* enthaltene Flüssigkeit ist Äther. Wird auf die mit einem

Digitized by Google

Stückchen feiner Leinwand umwickelte Kugel *b* etwas Äther gegossen, so bewirkt die Verdunstungskälte, daß sich in der Kugel *b* Ätherdampf verdichtet und in der Kugel *a* eine entsprechende Menge Äther verdampft. Diese Verdampfung hat eine Abkühlung der Kugel *a* zur Folge, und man muß an dem Thermometer *t* die Temperatur beobachten, bei welcher sich die Kugel mit Tau beschlägt. Um dies sicher beobachten zu können, ist ein Teil der Kugeloberfläche vergoldet.

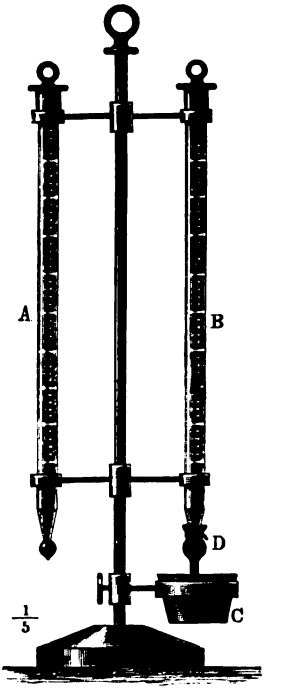
§ 421. Am genauesten und einfachsten ermittelt man die Feuchtigkeit der Luft mit Hilfe des Augustschen Psychrometers (Fig. 367). Es besteht aus zwei Thermometern,

Fig 366.



Daniellsches Hygrometer.

Fig. 367.



Augustsches Psychrometer.

die an einem und demselben Gestell befestigt sind. Die Kugel des einen Thermometers ist trocken, die des andern ist mit einem Stückchen Musselin umwickelt, welches in ein Gefäß mit Wasser taucht. Das erste Thermometer gibt die Lufttemperatur an, das andere eine zwischen dieser und dem Taupunkt liegende Temperatur. Diese Temperatur ist von der Bewegung der Luft ziemlich unabhängig, denn je schneller die Luft erneuert wird, desto mehr wirkt sie erwärmend, zugleich aber infolge der gesteigerten Verdunstung abkühlend. Diese Mittelstellung hat man genau untersucht und Tabellen entworfen, vermittelst deren man die absolute Feuchtigkeit, die relative Feuchtigkeit und den Taupunkt ermitteln kann.

Bei Temperaturen unter 0° muß man vor der Beobachtung die mit Eis überzogene Kugel in Wasser eintauchen, bis das Eis geschmolzen ist, dann das Gefäß mit Wasser entfernen und die Temperatur ablesen, sobald das Thermometer seinen tiefsten Stand erreicht hat.

Digitized by Google

Temperatur der Luft in Graden nach Celsius	Differenz des trockenen und befeuchteten Thermometers												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
— 20	0,9												
— 19	1,0												
— 18	1,1												
— 17	1,2	0,6											
— 16	1,3	0,8											
— 15	1,4	0,9											
— 14	1,5	1,0											
— 13	1,6	1,1											
— 12	1,8	1,2											
— 11	1,9	1,4											
— 10	2,1	1,5											
— 9	2,3	1'7											
— 8	2,5	1,8	1,0										
— 7	2,7	2,0	1,2										
— 6	2,9	2,2	1,4										
— 5	3,1	2,5	1,7										
— 4	3,4	2,7	1,9										
— 3	3,7	3,0	2,2	1,3									
— 2	4,0	3,2	2,4	1,6									
— 1	4,3	3,5	2,7	1,8									
0	4,6	3,8	3,0	2,1	1,3								
+ 1	4,9	4,1	3,3	2,4	1,6								
+ 2	5,3	4,4	3,5	2,7	1,9	1,0							
+ 3	5,7	4,8	3,8	3,0	2,2	1,3							
+ 4	6,1	5,2	4,2	3,3	2,4	1,6							
+ 5	6,5	5,6	4,6	3,5	2,6	1,8							
+ 6	7,0	6,0	5,0	4,0	2,9	2,0							
+ 7	7,5	6,5	5,4	4,4	3,3	2,3	1,4						
+ 8	8,0	7,0	5,9	4,8	3,7	2,7	1,7						
+ 9	8,6	7,5	6,4	5,3	4,1	3,1	2,1						
+ 10	9,2	8,1	6,9	5,8	4,7	3,5	2,5	1,5					
+ 11	9,8	8,7	7,5	6,3	5,2	4,0	2,9	1,9					
+ 12	10,5	9,3	8,1	6,9	5,7	4,5	3,4	2,3	1,3				
+ 13	11,2	9,9	8,7	7,4	6,3	5,0	3,9	2,8	1,7				
+ 14	11,9	10,7	9,3	8,1	6,8	5,6	4,4	3,3	2,2	1,1			
+ 15	12,7	11,4	10,0	8,7	7,5	6,1	5,0	3,8	2,7	1,6			
+ 16	13,5	12,2	10,8	9,5	8,1	6,9	5,5	4,3	3,2	2,1			
+ 17	14,4	13,1	11,6	10,2	8,8	7,5	6,2	4,9	3,7	2,6	1,5		
+ 18	15,4	13,9	12,4	11,0	9,6	8,2	6,8	5,5	4,3	3,1	2,0		
+ 19	16,4	14,8	13,3	11,8	10,4	9,0	7,5	6,2	4,9	3,7	2,5	1,5	
+ 20	17,4	15,8	14,2	12,7	11,2	9,7	8,3	6,9	5,6	4,3	3,1	1,9	
+ 21	18,5	16,9	15,2	13,6	22,1	10,6	9,1	7,6	6,3	5,0	3,7	2,5	
+ 22	19,7	17,9	16,3	14,6	13,0	11,5	10,0	8,4	7,0	5,7	4,4	3,1	1,9
+ 23	20,9	19,1	17.4	15,6	14,0	12,4	10,9	9,2	7,8	6,4	5,1	3,8	2,5
+ 24	22,2	20,3	18,5	16,7	15,0	13,4	11,8	10,1	8,7	7,2	5,8	4,5	3,2
+ 25	23,6	21,7	19,7	17,9	16,1	14,4	12,7	11,1	9,5	8,0	6,6	5,2	3,9
+ 26	25,0	22,9	20,9	19,1	17,2	15,5	13,8	12,1	10,5	8,9	7,4	6,0	4,6
+ 27	26,5	24,4	22,3	20,3	18,4	16,6	14,8	13,1	11,5	9,9	8,3	6,8	5,4
+ 28	28,1	25,9	23,8	21,7	19,7	17,8	16,0	14,2	12,5	10,8	9,2	7,7	6,2
+ 29	29,8	27,5	25,3	23,1	21,1	19,1	17,2	15,4	13,6	11,9	10,2	8,6	7,1
+ 30	31,6	29,2	26,9	24,7	22,5	20,5	18,5	16,6	14,7	13,0	11,3	9,6	8,0
+ 31	33,4	30,9	28,5	26,2	24,0	21,9	19,8	17,9	16,0	14,1	12,4	10,6	9,0
+ 32	35,4	32,8	30,3	27,9	25,6	23,4	21,3	19,2	17,3	15,4	13,5	11,7	10,0
+ 33	37,4	34,7	32,2	29,7	27,3	25,0	22,8	20,6	18,6	16,6	14,8	12,9	11,1
+ 34	39,6	36,8	34,2	31,5	29,0	26,7	24,5	22,2	20,0	18,0	16,1	14,1	12,3
+ 35	41,8	39,0	36,2	33,5	30,9	28,4	26,1	23,8	21,6	19,4	17,4	15,4	13,5

Digitized by Google

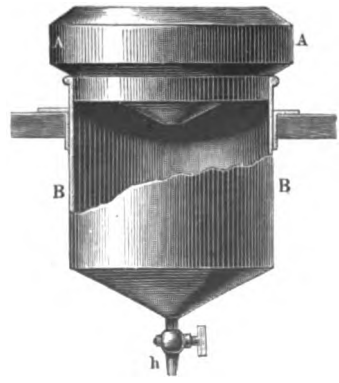
§ 422. Hat man die beiden Thermometer beobachtet, so findet man die absolute Feuchtigkeit in der Tabelle auf S. 464 an der Kreuzungsstelle der horizontalen Zeile der betreffenden Lufttemperatur und der vertikalen Spalte der betreffenden Differenz. Wenn z. B. das trockene Thermometer 15° und das feuchte 10° zeigt, so ist die absolute Feuchtigkeit 6,1, d. h. die Luft enthält im Cubikmeter 6,1 g Wasserdampf. Bei 15° würde die Luft mit 12,7 g Wasserdampf gesättigt sein (die Differenz würde 0° sein). Also ist die relative Feuchtigkeit 6,1 : 12,7 = 0,48 oder 48 Proz. Der Taupunkt ist, wie ebenfalls aus der Tabelle zu ersehen ist, 4°. Um den Druck, den der Dampf ausübt (die sog. Dunstspannung) zu ermitteln, hat man in dem vorliegenden Beispiel die Spannkraft des gesättigten Dampfes bei 15° aus der Tabelle auf S. 461 zu entnehmen und von dieser 48 Proz. zu berechnen. Die Dunstspannung würde also in dem angenommenen Falle 6,1 mm sein.

§ 423. Die relative Feuchtigkeit bildet ein Maß für das Trockenvermögen der Luft. Je geringer die relative Feuchtigkeit ist, desto mehr Wasserdampf kann die Luft noch aufnehmen, desto schneller werden also feuchte Gegenstände infolge der Verdunstung trocken.

Die absolute Feuchtigkeit gibt an, wieviel Feuchtigkeit überhaupt in der Luft enthalten ist, also wieviel Wasser sich durch eine geeignete Behandlung der Luft aus derselben abscheiden lassen würde.

Der Taupunkt bezeichnet die Grenztemperatur, die bei der Abkühlung der Luft nicht leicht überschritten wird. Wenn nämlich der Taupunkt erreicht ist, so fängt der in der Luft enthaltene Wasserdampf an sich zu verdichten. Durch diesen Vorgang wird aber soviel Wärme frei, daß der Wärmeverlust durch Ausstrahlung während der Nacht ganz oder größtenteils ausgeglichen wird. Daher kann man im Frühjahr aus der Lage des Taupunktes mit ziemlicher Sicherheit einen Schluß ziehen, ob Nachtfrost zu befürchten ist oder nicht.

Fig. 368.



Regenmesser.

§ 424. Instrumente zur Messung der Regenmenge sind ungefähr ebenso lange in Gebrauch wie Barometer und Thermometer. Sowohl Hooke (1670) als Mariotte haben Regenmesser in Gebrauch gehabt. Eine zweckmäßige Form des Regenmessers ist die in Fig. 368 abgebildete. Der Apparat besteht aus einem Blechgefäß, dessen oberer Teil die Form eines Trichters hat. Der zylindrische Rand dieses Trichters hat einen Querschnitt von 0,1 Quadratmeter. Das Instrument wird etwa 2 Meter über dem Erdboden aufgestellt, und das Wasser, welches sich bei Regenwetter in dem Gefäß ansammelt, wird in einen Maßzylinder gegossen. Jedes Cubik-

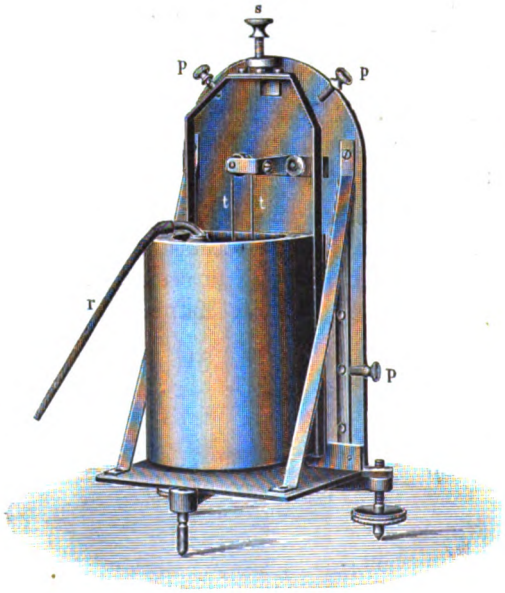
Digitized by Google

centimeter Waſſer entſpricht dann, wie eine einfache Rechnung ergibt, einer Regenhöhe von einem hundertſtel Millimeter.

§ 425. Ein Mittel, die Richtung des Windes bequem zu erkennen, hat man ſeit undenklichen Zeiten in der Wetterfahne gehabt. Ein Wimpel iſt jedoch vorzuziehen, da ein Flügel, der ſich um eine vertikale Achſe dreht, leicht falſch zeigen kann, namentlich wenn die Achſe nicht genau vertikal iſt. Es iſt auch weſentlich, daß die Vorrichtung, welche die Windrichtung anzeigen ſoll, von benachbarten Gebäuden und großen Dachflächen möglichſt weit entfernt iſt, weil durch dieſe die Windrichtung oft ſtark beeinflußt wird.

Zur Meſſung der Windſtärke hat man verſchiedene Inſtrumente konſtruiert. Einige derſelben geben den Druck, andere die Geſchwindigkeit des Windes an. Hier ſoll nur eins dieſer Inſtrumente (Anemometer) beſchrieben werden. Es iſt ohne Zweifel das zuverläſſigſte, namentlich auch deshalb, weil es leicht in freier Stellung, z. B. auf der Spitze einer Flaggenſtange, angebracht werden kann.

Fig. 369.



Anemometer.

Wenn der Wind horizontal über das Ende eines vertikalen Rohres hinwegbläſt, ſo übt er auf die in dem Rohre enthaltene Luft eine ſaugende Wirkung aus, indem er an der Mündung des Rohres Luft mit ſich fortreißt. Dieſer Vorgang wurde zuerſt 1873 von Magius in Kopenhagen zur Meſſung der Windſtärke benutzt. Das Rohr war an einer Stange befeſtigt und ſtand mit einem Glasrohr in Verbindung, welches ſich im Innern des Hauſes befand und mit dem unteren Ende in Waſſer eintauchte. Die Höhe, bis zu welcher das Waſſer durch den Wind in dem Glasrohr emporgezogen wurde, bildete das Maß für die Windſtärke. Nachdem G. A. Hagemann die ſaugende Wirkung des Windes genauer unterſucht und verſchiedene Apparate zur Meſſung dieſer Wirkung angegeben hatte, kamen Anemometer von der in Fig. 369 abgebildeten Form in Gebrauch. Die Figur ſtellt ein vom Kapitän Rung konſtruiertes Inſtrument vor. Der Apparat beſteht aus einem Zinkgefäß mit doppelten Wänden. Unten ſteht der innere Raum mit dem Hohlraum der Wand in Verbindung, ſo daß das Waſſer in beiden Räumen

Digitized by Google

gleich hoch steht. In den Hohlraum der Wand mündet oben das Saugrohr *r*. Der Wind bewirkt also, daß das Wasser in dem Hohlraum der Wand steigt und in dem Gefäße selbst sinkt. Die Schwankungen der Oberfläche des Wassers werden durch einen Schwimmer und den in der Figur sichtbaren Faden *t* auf eine Rolle übertragen. Die Achse dieser Rolle bewegt einen (in der Figur nicht sichtbaren) Zeiger, der sich je nach der Stärke des Windes auf die entsprechenden Stellen eines geteilten Kreises einstellt. Das Wassergefäß kann vermittelst der Schraube *s* gehoben und gesenkt werden. Hierdurch ist es ermöglicht, den Zeiger für „Windstille" auf den Nullpunkt der Teilung einzustellen.

§ 426. Bereits Hooke hat einen Apparat konstruiert, der die Angaben verschiedener meteorologischer Instrumente zu bestimmten Zeiten aufzeichnete. Dieser Apparat wurde der Gesellschaft der Wissenschaften in London im Jahre 1670 vorgezeigt.

Heutzutage sind auf den Observatorien zahlreiche „selbstregistrierende" Instrumente in Gebrauch. Einige derselben zeichnen den Stand der Instrumente ununterbrochen auf, wie z. B. die in § 246 beschriebenen Instrumente zur Aufzeichnung der Deklination und Inklination der Magnetnadel sowie der Intensität des Erdmagnetismus. Andere Instrumente sind so eingerichtet, daß der Stand immer nach Ablauf einer gewissen Zeit, z. B. alle fünf Minuten, jede Viertelstunde oder jede Stunde aufgezeichnet wird. Auf eine nähere Beschreibung dieser Instrumente, bei denen teils mechanische, teils optische und teils elektrische Hilfsmittel verwendet werden, kann hier nicht näher eingegangen werden. Der Gebrauch derartiger Instrumente hat selbstverständlich, was die Bequemlichkeit und Vollständigkeit der Beobachtungen betrifft, große Vorzüge vor der persönlichen Beobachtung des Standes der betreffenden Instrumente.

Klima.

§ 427. Das unermeßliche Beobachtungsmaterial, welches im Laufe der Jahre auf den zahlreichen meteorologischen Stationen gesammelt wird, bildet die Grundlage für die Charakterisierung des Klimas der verschiedenen Gegenden. Außerdem dienen die gleichzeitig angestellten Beobachtungen der einzelnen Tage zur Herstellung der sogenannten synoptischen Karten. Diese geben für ein größeres Gebiet und für eine bestimmte Stunde des Tages den Luftdruck, die Temperatur, die Windrichtung u. s. w. an. Diese Karten veranschaulichen die augenblickliche Wetterlage, und wenn man die Karten von zwei aufeinander folgenden Tagen vergleicht, so bekommt man ein anschauliches Bild

Digitized by Google

davon, wie sich die Wetterlage im Laufe des Tages geändert hat. Wir müssen uns hier darauf beschränken, nur die wichtigsten Ergebnisse dieser Beobachtungen hervorzuheben.

§ 428. In den Änderungen der Temperatur und des Luftdruckes macht sich eine gewisse tägliche und jährliche Regelmäßigkeit geltend, die jedoch oft durch unregelmäßige Veränderungen verschleiert wird. Diese letzteren sind für das Klima eines Ortes ebenso bezeichnend wie die ersteren. Im allgemeinen treten die Unregelmäßigkeiten am stärksten außerhalb der Tropen auf, und namentlich in Gegenden, die in der Nähe der Meeresküste liegen.

Bei der Wärme, die eine so wichtige Rolle in der Natur spielt, ist die tägliche Schwankung am größten in den Tropen, namentlich im Binnenlande. Dies ist eine natürliche Folge des Umstandes, daß am Äquator das ganze Jahr hindurch Tag- und Nachtgleiche herrscht und daß die Sonne jeden Tag mehr oder weniger annähernd bis zum Zenit steigt. An Orten, die nicht weit vom Äquator entfernt sind, sind die Verhältnisse von den am Äquator selbst herrschenden nicht erheblich verschieden. Da das Festland eine geringere spezifische Wärme besitzt als das Wasser, so erwärmt es sich schneller und kühlt sich schneller ab als dieses. Wenn sich aber die Erdoberfläche erwärmt oder abkühlt, so überträgt sich diese Erwärmung und Abkühlung auch auf die Luft, die mit der Erdoberfläche in Berührung ist.

In den gemäßigten Gegenden, z. B. in Dänemark, ist die tägliche Schwankung der Temperatur im Sommer am größten, aber doch in verschiedenen Teilen des Landes merklich verschieden. Der Unterschied zwischen der höchsten und niedrigsten Temperatur im Laufe eines Tages ist an Orten, die weit von der Küste entfernt liegen, z. B. Birkebaek in Jütland, und Orten, die in der Nähe der Küste liegen, z. B. Sandvig auf Bornholm, sehr verschieden:

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
Birkebaek	7,5	6,4	8,7	11,9	13,8	13,4
Sandvig	3,1	3,2	3,6	4,8	6,2	6,2

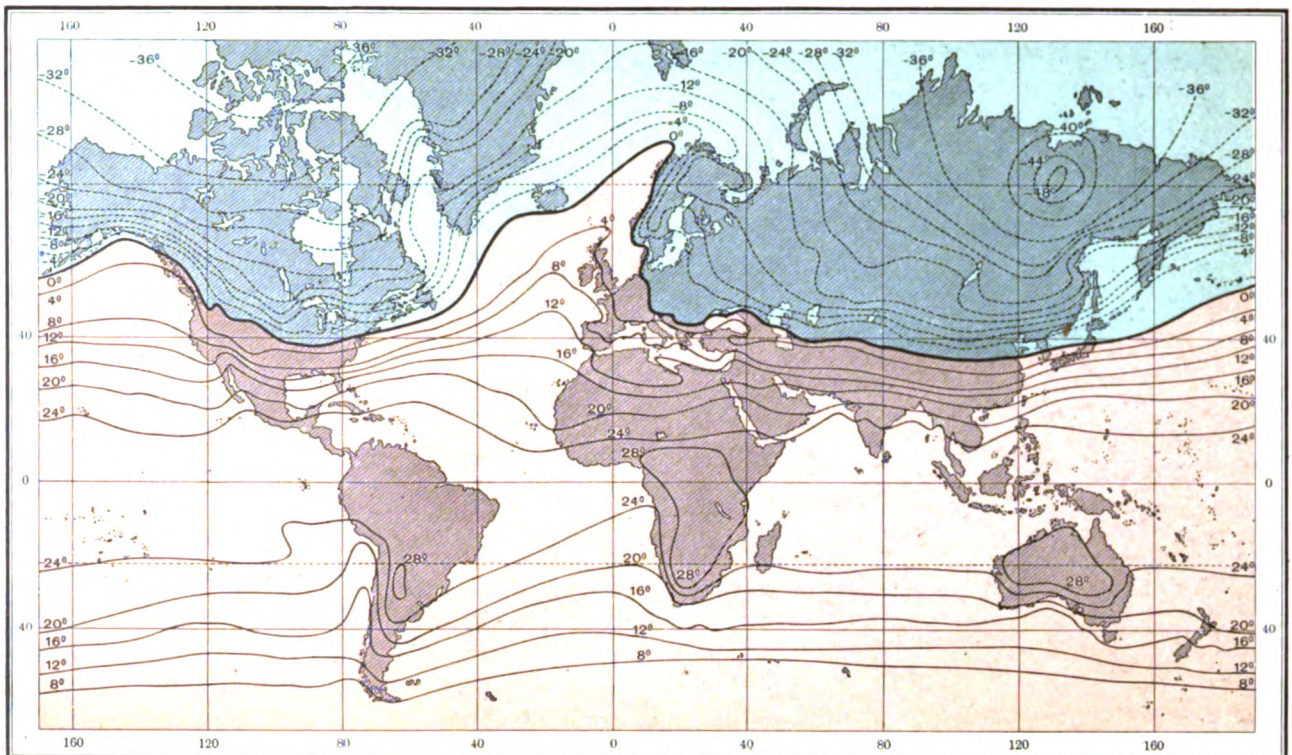
	Juli	August	Septbr.	Oktober	Novbr.	Dezember
Birkebaek	11,9	12,4	10,9	9,1	7,3	6,0
Sandvig	6,1	5,4	4,6	3,8	3,2	2,8

Die höchste Temperatur tritt im Winter um 1 Uhr, im Sommer um 2 bis 3 Uhr ein, die niedrigste Temperatur $^1/_2$ bis 1 Stunde vor Sonnenaufgang, also im Sommer und im Winter zu sehr verschiedenen Zeiten. Besonders groß ist der Unterschied zwischen der höchsten und niedrigsten Temperatur an klaren Tagen.

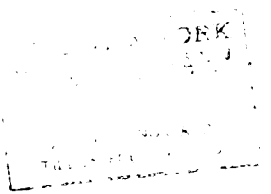
§ 429. Im Gegensatz zu der täglichen Schwankung ist die jährliche Schwankung der Temperatur am Äquator unbedeutend. Ob die Sonne genau

Digitized by Google

Isothermen für Januar.

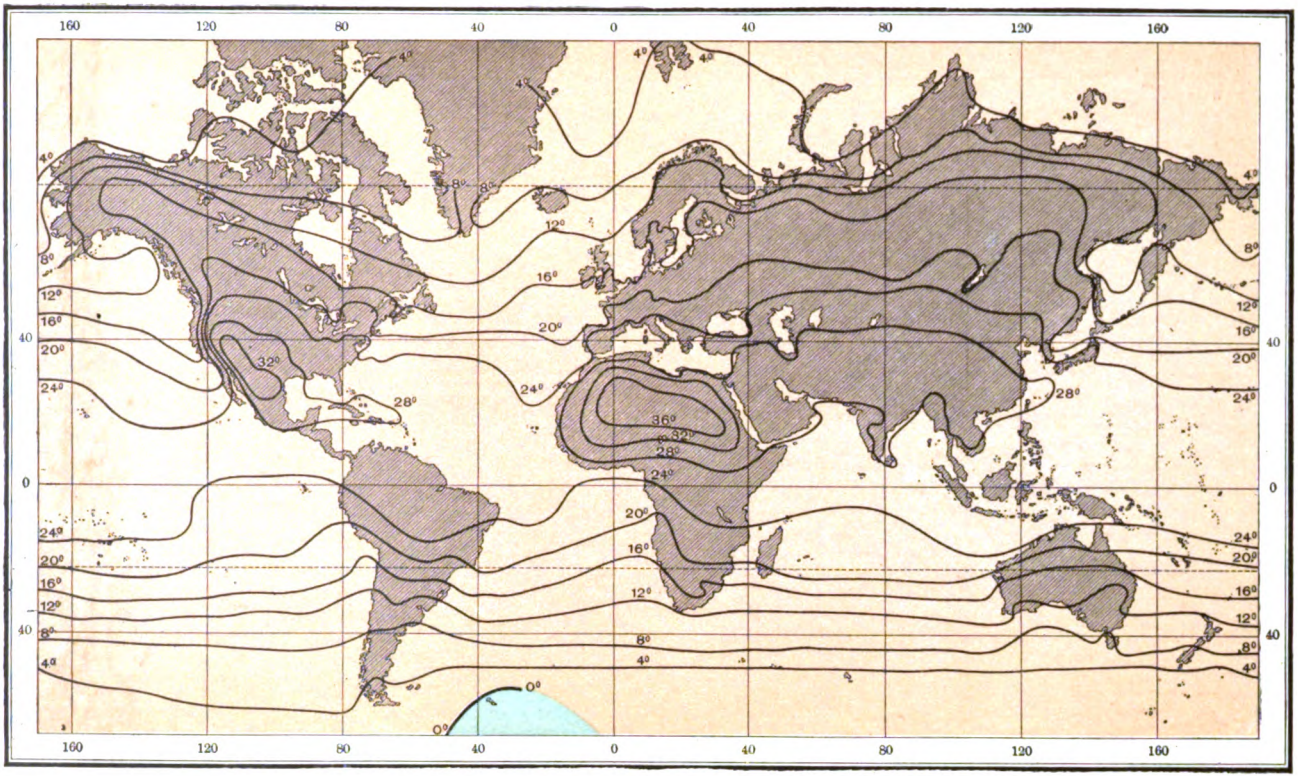


Digitized by Google



Digitized by Google

Isothermen für Juli.

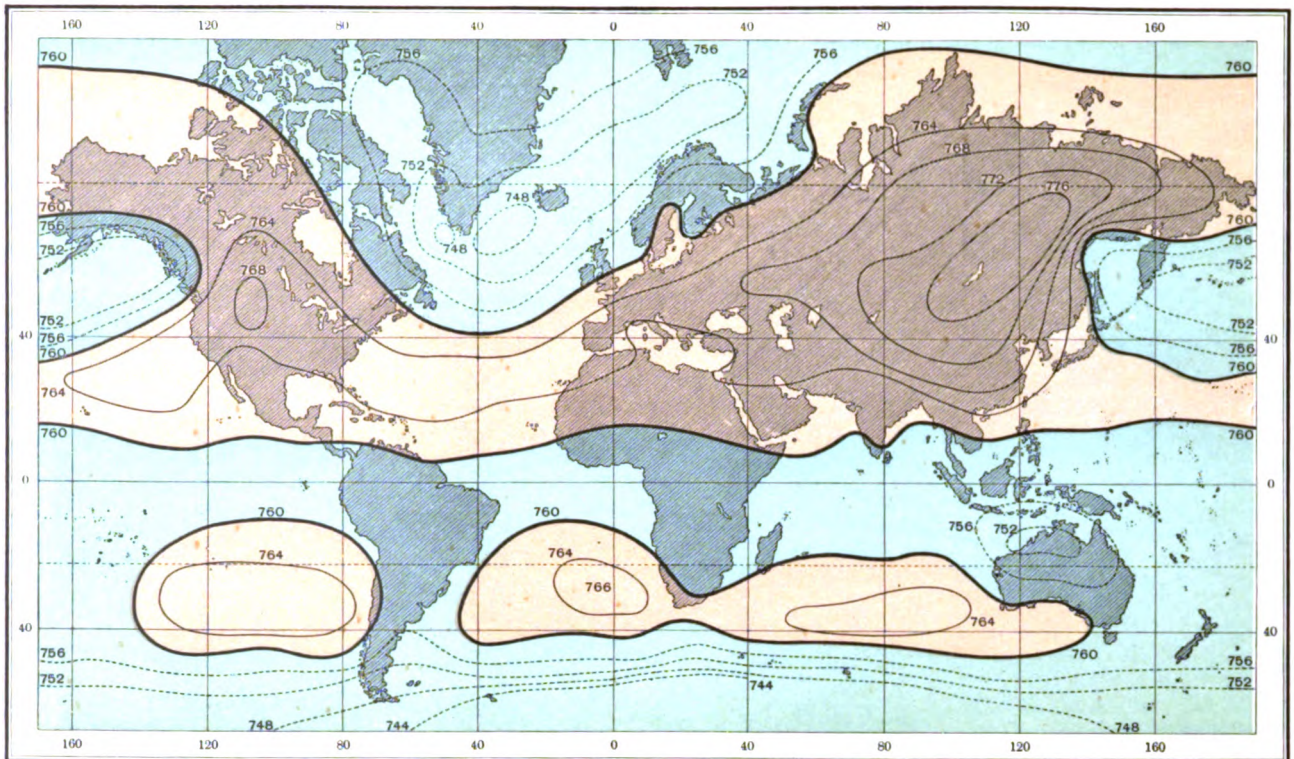


Digitized by Google

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY

Digitized by Google

Isobaren für Januar.

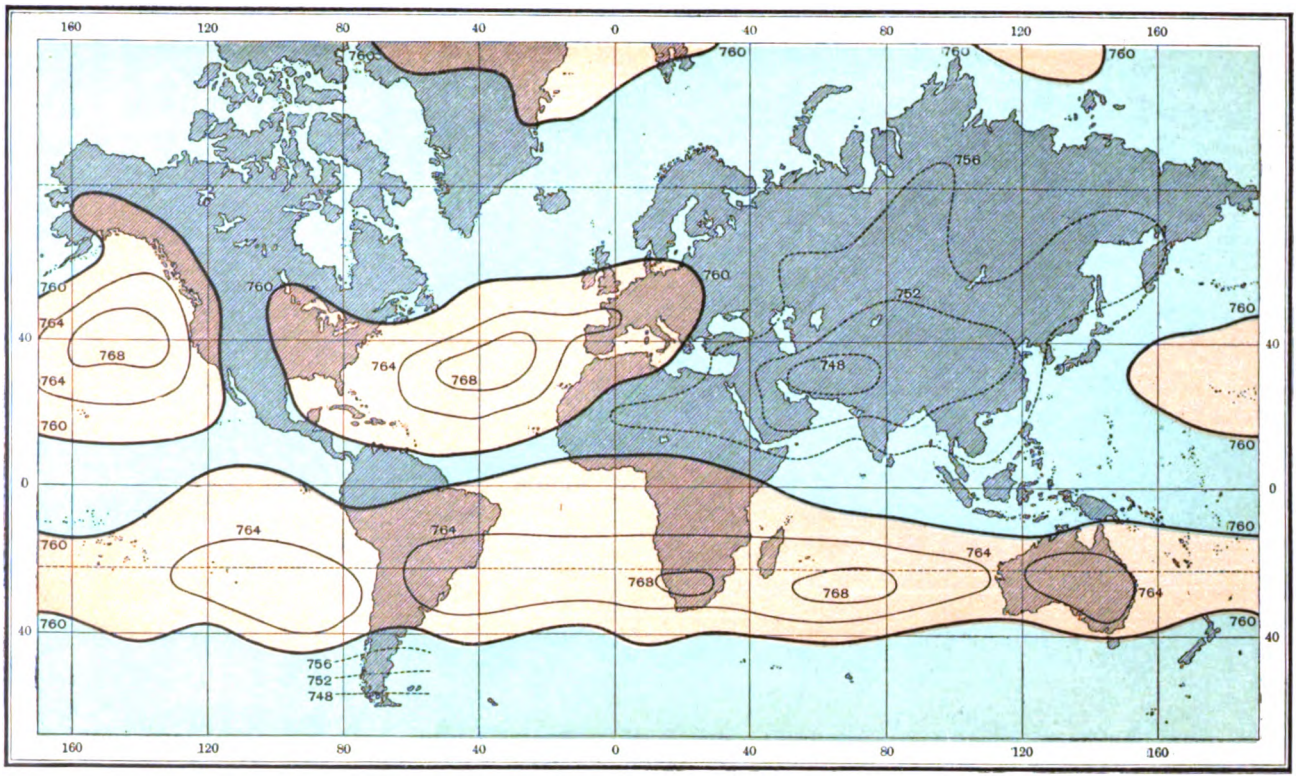


Digitized by Google

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS

Digitized by Google

Isobaren für Juli.



Digitized by Google

THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY

ASTOR, LENOX AND
TILDEN FOUNDATIONS.

Digitized by Google

durch das Zenit geht oder ein wenig nördlich oder südlich an demselben vorüber, fällt nicht ins Gewicht, ebensowenig die geringe Abweichung von der Gleichheit von Tag und Nacht an Orten, die nicht genau unter dem Äquator liegen. In gemäßigten Gegenden, z. B. Dänemark, steigt die Sonne im Sommer 58°, im Winter dagegen nur 11° über den Horizont, und im Sommer sind die Tage dreimal so lang wie im Winter. Daher ist der Unterschied zwischen der Sommertemperatur und der Wintertemperatur verhältnismäßig groß. Aber auch hier macht es einen großen Unterschied, ob der betreffende Ort mitten im Lande oder in der Nähe der Meeresküste liegt. Der Unterschied zwischen der mittleren Temperatur des wärmsten und des kältesten Monats ist auf den Färöern nur 7°, in Dänemark dagegen 17°, in St. Petersburg 26° und an manchen Orten in Sibirien 50° und mehr. Die höchste Temperatur tritt ungefähr einen Monat nach der Sommersonnenwende (im Juli) und die niedrigste einen Monat nach der Wintersonnenwende (im Januar) ein.

§ 430. Auf den beigefügten Tafeln ist die Verteilung der Wärme auf der Erdoberfläche durch die sog. Isothermen dargestellt, d. h. durch die Linien, welche diejenigen Orte miteinander verbinden, welche dieselbe mittlere Temperatur haben. Auf der südlichen Halbkugel sind die Verhältnisse ziemlich gleichförmig, d. h. die Isothermen verlaufen ziemlich geradlinig, weil hier nur wenig Festland ist. Auf der nördlichen Halbkugel dagegen bewirken die großen Kontinente im Januar eine starke Abkühlung und im Juli eine starke Erwärmung. Die Zone der größten Wärme (24°) liegt im Januar auf den Weltmeeren auf beiden Seiten des Äquators, und zwar vorzugsweise auf der südlichen. Namentlich in Südamerika, Afrika und Australien erstreckt sie sich weit nach Süden. Im Sommer liegt diese Zone dagegen mehr nördlich vom Äquator, namentlich im amerikanischen und im asiatischen Kontinent.

Endlich ist hervorzuheben, daß außerhalb der Tropen die Westküsten der Kontinente im Winter viel wärmer sind als die Ostküsten. Dies hat seinen Grund vorzugsweise darin, daß in den gemäßigten Gegenden westliche Winde vorherrschen. Die Seewinde sind aber im Winter milde.

§ 431. In engem Zusammenhang steht mit der Verteilung der Wärme die Verteilung des Luftdruckes. Die beigegebenen Tafeln veranschaulichen die Verteilung des Luftdruckes im Januar und im Juli. Die eingezeichneten Linien sind die Isobaren, d. h. die Linien, welche diejenigen Orte verbinden, welche gleichen mittleren Luftdruck besitzen. In der Verteilung des Luftdruckes kann man fünf Zonen unterscheiden. Eine Zone niedrigen Luftdruckes (blau) erstreckt sich über dieselben Gegenden, in denen der Wärmeäquator liegt, im Januar mehr südlich vom Äquator mit Ausbuchtungen in den südlichen Kontinenten, im Juli mehr nördlich vom Äquator mit starken Ausbuchtungen in Asien und Nordamerika.

Auf beiden Seiten dieser Zone liegt je eine Zone mit hohem Luftdruck. Sehr gleichförmig verläuft die Zone auf der südlichen Halbkugel. Die Zone auf der nördlichen Halbkugel ist im Januar am stärksten über den Kontinenten,

Digitized by Google

im Juli dagegen am stärksten über den Meeren entwickelt. Die ersteren sind im Januar kalt, die letzteren im Juli verhältnismäßig kühl.

Auf diese beiden Zonen hohen Luftdrucks folgen wieder zwei Zonen niedrigen Luftdrucks, von denen die auf der südlichen Halbkugel regelmäßiger verläuft als die auf der nördlichen.

Erklärungen.

§ 432. Die Temperatur- und Luftdruckkarten geben nur den mittleren Zustand im Januar und Juli an. Aber dieser mittlere Zustand ist nur in den Tropen der allgemeine Zustand, was natürlich aus den Karten nicht zu ersehen ist. Nur in den Tropen ist die Verteilung der Wärme und des Luftdruckes fast immer so, wie es die Karten angeben. An einzelnen Orten kommen natürlich Abweichungen, zuweilen sogar sehr bedeutende, vor, aber dies sind doch immer nur Ausnahmen von der allgemeinen Regel.

In den gemäßigten und in den kalten Gegenden ist dagegen der Zustand fast niemals so, wie es die Karte angibt. Der Luftdruck ändert sich fortwährend, und diese Veränderungen stehen, wie wir sehen werden, in engem Zusammenhang mit den Winden. Es dauerte lange, bis man diesen Zusammenhang erkannte, obgleich es auch in den ersten Zeiten des Barometers nicht an Versuchen gefehlt hat, den Zusammenhang zwischen dem Barometerstand und der Wetterlage zu erklären. Bei diesen Erklärungsversuchen nahm man seine Zuflucht zu verborgenen Kräften, zu Dünsten, die aus dem Erdinnern ausströmen, oder man schrieb dem Luftmeer eine von Pol zu Pol in die Länge gezogene Form zu, so daß die Nordwinde, die überdies aus der Höhe niederstürzten, einen starken Luftdruck im Gefolge haben mußten.

§ 433. Ein eigentliches Verständnis dieser Verhältnisse wurde durch Beobachtungen angebahnt, die in den Tropen gemacht wurden, wo die Verhältnisse am einfachsten liegen. Halley (§ 226) gab, gestützt auf eigene Erfahrung, eine gute Beschreibung der Passatwinde und der Monsune. Die ersteren sucht er in folgender Weise zu erklären.

Die Erwärmung der Erde schreitet, dem täglichen Lauf der Sonne um die Erde (daß diese Bewegung nur eine scheinbare ist, ist für diese Betrachtungen nebensächlich) entsprechend, von Osten nach Westen fort. Die erwärmte Luftmasse muß Platz haben. Nach Osten hin kann sie nicht entweichen, da sie von hier aus erwärmt worden ist. Nach Norden und Süden kann sie auch nicht entweichen, denn auch hier findet Erwärmung statt, wenn auch in geringerem Grade als am Äquator. Sie muß also nach Westen entweichen,

Digitized by Google

wo noch keine Erwärmung eingetreten ist. Infolgedessen ist der Passatwind im wesentlichen ein Ostwind.

Daß diese Erklärung nicht richtig ist, geht daraus hervor, daß an der wärmsten Stelle (am Wärmeäquator) gar kein Passatwind weht.

§ 434. Weit glücklicher war Halleys Zeitgenosse Georg Hadley, der in den Schriften der Englischen Gesellschaft der Wissenschaften 1735 eine Erklärung veröffentlichte, die leider lange Zeit unbeachtet blieb. Später, als man erkannte, daß die Erklärung richtig ist, ist die Ehre, sie gefunden zu haben, oft infolge einer Namensverwechselung Halley zugeschrieben worden.

Da, wo die Luft am stärksten erwärmt wird (am Wärmeäquator), ist sie am stärksten ausgedehnt und daher am leichtesten. Infolgedessen strömt die kühlere Luft von beiden Seiten nach dem Äquator hin und treibt die warme Luft in die Höhe. Es entsteht also am Äquator ein aufsteigender Luftstrom. Die Luft, welche sich dem Äquator nähert, kommt aber nach Stellen der Erdoberfläche, die weiter von der Erdachse entfernt sind und die daher eine größere Geschwindigkeit in der Richtung von Westen nach Osten haben als die ankommende Luft. Diese kann der schnelleren Bewegung der Erde nicht folgen und wird daher als Gegenwind empfunden, d. h. der Wind, der nördlich vom Äquator eigentlich Nordwind ist, wird Nordostwind, und der Wind, der südlich vom Äquator Südwind ist, wird Südostwind. Der erstere bildet den Nordostpassat, der letztere den Südostpassat.

In ähnlicher Weise erklärte Hadley die Entstehung der Monsune, die in Indien und anderen Gegenden regelmäßig wehen und von Halbjahr zu Halbjahr ihre Richtung ändern. Im Winter ist es südlich von Indien am wärmsten. Es muß also hier nach der vorhergehenden Erklärung Nordostwind wehen. Im Sommer dagegen ist es auf dem asiatischen Festlande, nördlich von Hindostan, am wärmsten. Also muß die Luft von Süden her nach diesen Gegenden hinströmen. Da sich aber die Luft vom Äquator entfernt und nach Gegenden kommt, die eine geringere Geschwindigkeit in der Richtung nach Osten haben, eilt die Luft diesen Gegenden voraus und der Südwind verwandelt sich in Südwestwind.

§ 435. Die Luft, welche in den Äquatorialgegenden in die Höhe steigt, strömt von hier nach Norden und Süden ab, kommt also in Gegenden, die eine geringere Geschwindigkeit haben, als die Luft, welche die Geschwindigkeit hat, die sie am Äquator angenommen hat. Die Luft eilt also diesen Gegenden voraus und die Luftströmung geht auf der nördlichen Halbkugel in Südwestwind, auf der südlichen Halbkugel in Nordwestwind über. Diese Winde bilden in den höheren Luftschichten den Antipassat. Man kann ihn daran erkennen, daß hochschwebende Wolken in entgegengesetzter Richtung ziehen wie der Passat. Auf sehr hohen Inseln unter dem Passat, wie z. B. auf Teneriffa, herrscht auf der Spitze der Antipassat. In den Gegenden, die hohen Luftdruck haben, sinkt er nach und nach auf die Erdoberfläche (Meeresfläche) herab.

§ 436. Mit dem Verständnis der Erscheinungen außerhalb der Tropen war es bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts schlecht bestellt. Man war

Digitized by Google

der Ansicht, der große Unterschied in den Windverhältnissen innerhalb und außerhalb der Tropenzone bestehe im wesentlichen darin, daß die beiden großen Strömungen, der Passat und der Antipassat, in den gemäßigten Gegenden nicht, wie in den Tropen, übereinander liegen, sondern nebeneinander her gehen und dabei fortwährend ihre Lage ändern, so daß wir uns bald im polaren Nordost, bald im äquatorialen Südwest befinden. Für die Art und Weise, wie sich diese Winde gegenseitig verdrängen, hatte man recht sonderbare Erklärungen.

Da man beobachtet hatte, daß ein Ostwind zuweilen erst in England, dann in Dänemark und schließlich in St. Petersburg auftritt, daß er sich also sozusagen rückwärts fortpflanzt, führte man den merkwürdigen Begriff der „Saugwinde" ein.

Alle diese Auffassungen wurden verdrängt und durch etwas sehr einfaches ersetzt, durch die Aufstellung des Buijs-Ballotschen Gesetzes.

§ 437. Verschiedene Meteorologen, wie z. B. der Amerikaner Coffin (geb. 1815), hatten gefunden, daß der Wind nicht, wie man denken sollte, von der Stelle des hohen Luftdruckes (des Maximums) nach der Stelle des niedrigen Luftdruckes (des Minimums) hin weht. Vollständig aufgeklärt wurden diese Verhältnisse durch den Holländer Buijs-Ballot. Er lebte von 1817 bis 1890 und war Professor der Mathematik und Direktor des meteorologischen Instituts in Utrecht.

Buijs-Ballot war einer von den Naturforschern, die vor allen Dingen die Natur befragen. Er sammelte mit großem Fleiße eine große Menge meteorologischer Beobachtungen. Er trug die zu gleicher Zeit gemachten Beobachtungen in eine Karte ein und fand auf diese Weise, daß der Wind zwar annähernd, aber nicht genau nach der Stelle des niedrigen Luftdruckes weht, sondern (auf der nördlichen Halbkugel) mehr nach rechts, nicht selten so, daß er von der Richtung nach dem Minimum des Luftdruckes 60° bis 80° abweicht. Wenn man also mit dem Winde geht oder dem Winde den Rücken zuwendet, so hat man die Stelle des niedrigen Luftdruckes (das barometrische Minimum) links, und zwar ziemlich weit links vor sich.

§ 438. Daß der Wind diese Richtung annimmt, ist eine Folge davon, daß alles, was sich auf der nördlichen Halbkugel bewegt, das Bestreben hat, von der ursprünglichen Richtung der Bewegung nach rechts abzuweichen.

Um sich diese Erscheinung in der einfachsten Weise zu erklären, müssen wir uns zunächst vergegenwärtigen, wie die Achsendrehung der Erde auf einen ruhenden Körper einwirkt. Man kann sich vorstellen, der Körper schwimme auf einem stehenden Wasser, z. B. auf einem kleinen See. Die Zentrifugalkraft strebt ihn natürlich von der Erdachse zu entfernen und nach dem Äquator hin, also bis an das südliche Ufer des Sees zu treiben. Aber die Oberfläche des Sees hat sich ebenfalls der Wirkung der Zentrifugalkraft entsprechend eingestellt. Das südliche Ufer ist vom Mittelpunkt der Erde gerade um soviel weiter entfernt als das nördliche, daß kein Wasser mehr

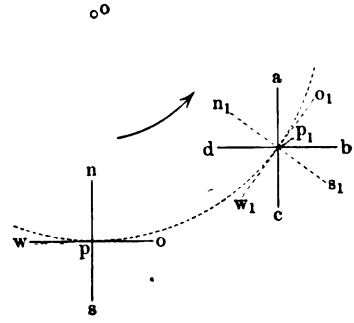
Digitized by Google

nach dem südlichen Ufer hin zu strömen braucht. Deshalb hat auch ein auf der Oberfläche des Wassers schwimmender Körper nicht das Bestreben, sich nach Süden hin zu bewegen.

Wenn aber der Körper eine eigene Bewegung hat, so findet man den Ort, den er erreicht, indem man die Bewegung ohne weiteres an der Stelle anbringt, die der Körper ohne eigene Bewegung nach einer gewissen Zeit erreicht haben würde.

Es sei o (Fig. 370) die Erdachse vom Nordpol aus gesehen, p die Stelle, wo sich der Körper augenblicklich befindet, p_1 die Stelle, wo er sich nach einiger Zeit befindet, indem sich die Erde in der Richtung des Pfeiles dreht. Wir wollen uns vorstellen, wir hätten von p aus einen Körper in der Richtung nach Norden, n, ausgesandt, einen anderen nach Osten, o, einen dritten nach Süden, s, und einen vierten nach Westen, w. Wenn wir uns später im Punkt p_1 befinden, werden sich diese Körper in den Punkten a, b, c und d befinden. Es hat sich also a von Norden, n_1, nach rechts entfernt, und ebenso haben sich b von Osten, o_1, c von Süden, s_1, und d von Westen, w_1, nach rechts entfernt.

Fig. 370.



Drehung nach rechts infolge der Rotation der Erde.

Würde man die Erdachse vom Südpol aus betrachten, so müßte man dem Pfeil die entgegengesetzte Richtung geben, und die Bewegung des Körpers würde nach links abbiegen.

Ein Beispiel dieser Ablenkungen bilden die großen Meeresströmungen. Im nördlichen Atlantischen Ozean und im Stillen Ozean sind die Ablenkungen nach rechts, in den südlichen Meeren nach links vorherrschend. In den mehr begrenzten Teilen der Meere werden natürlich durch Küsten und Untiefen vielfache Abweichungen hervorgerufen.

§ 439. Das Buijs-Ballotsche Gesetz gilt zwar im wesentlichen nur für die in einem bestimmten Augenblick herrschende Verteilung des Luftdruckes und die sich aus dieser ergebende Windrichtung, aber man kann es doch auch auf die mittlere Verteilung des Luftdruckes und die entsprechende vorherrschende Windrichtung anwenden. Aus dem Verlaufe der Isobaren für die Monate Januar und Juli kann man ziemlich sicher schließen, welche Winde an irgend einem Orte in den genannten Monaten vorherrschend sind.

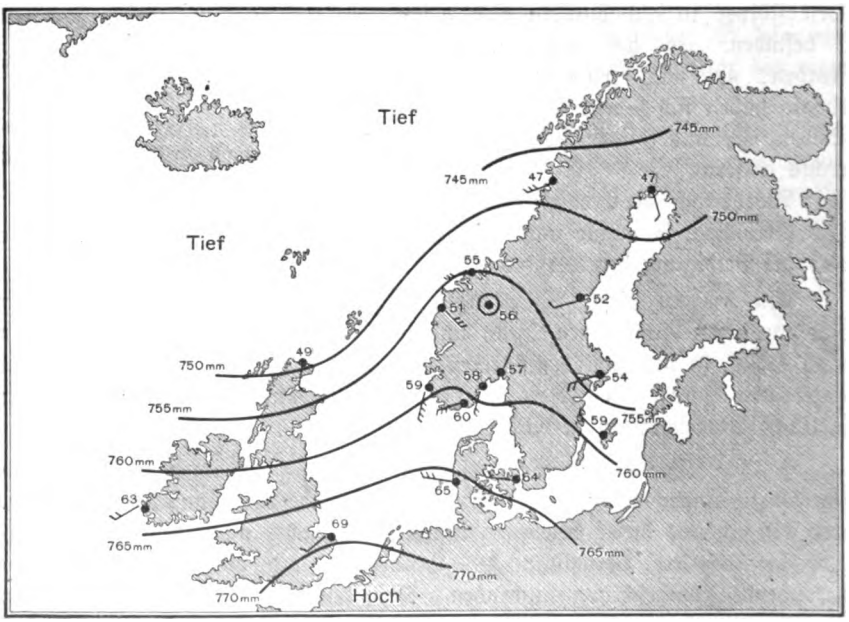
Auch die Passate und die Monsune finden, wie ein Blick auf die Karte lehrt, durch das Gesetz von Buijs-Ballot ihre Erklärung. Hier ist der Zustand ein dauernder. Aber auch außerhalb der Tropen, wo der Zustand veränderlich ist, geben die Isobaren die vorherrschende Windrichtung an. In Dänemark ist z. B. im Januar Südwestwind und im Juli Westwind vor-

Digitized by Google

herrschend. In Prozenten ausgedrückt ist die Häufigkeit der Winde in Dänemark die folgende:

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
N	5	5	8	7	8	8	5	5	5	5	7	6
NO	9	10	10	14	10	7	4	5	6	9	11	9
O	11	14	13	19	10	9	5	8	8	14	10	11
SO	12	15	12	14	10	9	9	10	13	14	13	12
S	13	13	9	8	8	7	9	10	12	11	13	11
SW	22	18	15	11	15	14	17	17	19	18	20	20
W	17	15	17	12	19	22	26	23	19	14	14	19
NW	9	8	13	11	16	19	20	17	14	12	9	10
Stille . . .	2	2	3	4	4	5	5	5	4	3	3	2

Fig. 371.



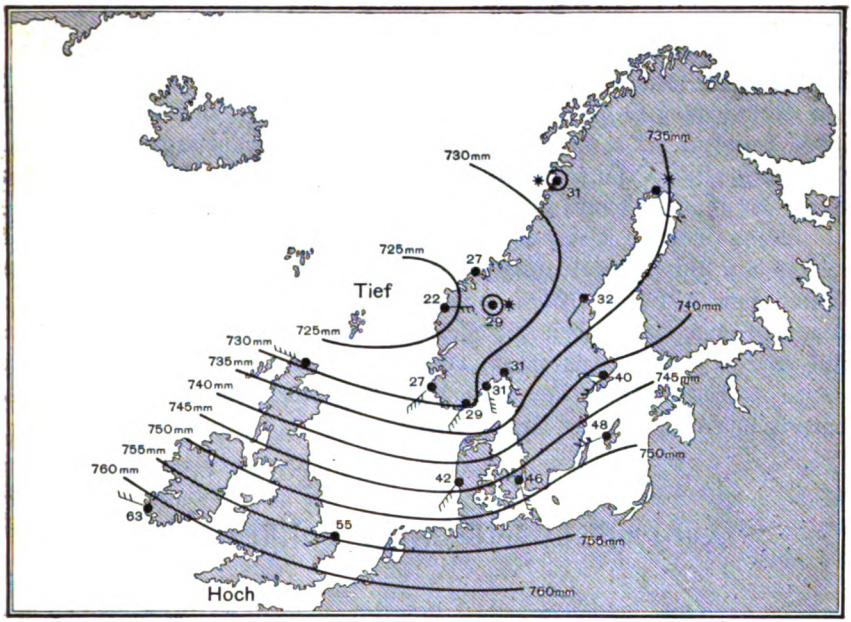
Wetterkarte vom 15. Dezember 1873.

§ 440. Vollständig zur Geltung kommt das Buijs-Ballotsche Gesetz doch nur bei den synoptischen Karten, welche die augenblickliche Wetterlage für einen größeren Teil der Erdoberfläche zum Ausdruck bringen.

Derartige Karten werden auf den meteorologischen Instituten jeden Tag nach telegraphischen Nachrichten hergestellt. Das dänische meteorologische

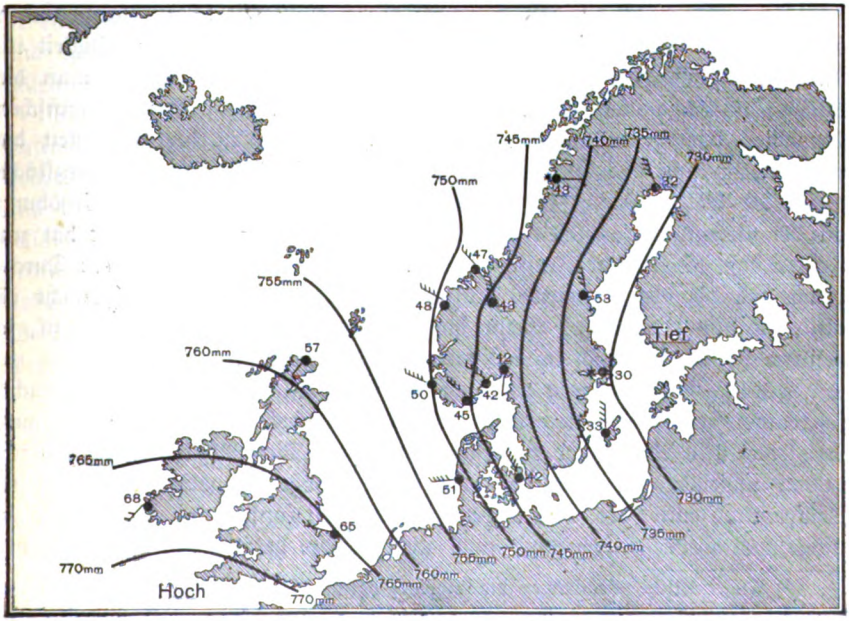
Digitized by Google

Fig. 372.



Wetterkarte vom 16. Dezember 1873.

Fig. 373.



Wetterkarte vom 17. Dezember 1873.

Digitized by Google

Institut wurde 1872 errichtet[1]). Die Figuren 371, 372 und 373 (S. 474 u. 475) geben die Wetterlage für drei aufeinander folgende Tage (morgens 8 Uhr) an. Die einzelnen Beobachtungsstationen sind durch kleine Kreise bezeichnet, die je nach der Bewölkung (viertel, halb oder ganz) geschwärzt sind. Die Windrichtung ist an jeder Station durch einen (mit dem Winde fliegenden) Pfeil bezeichnet. Die Anzahl der Federn gibt die Windstärke an (1 gleich schwach, 6 gleich Orkan). Windstille wird durch einen Kreis um die Station, Regen durch einen Punkt, Schnee durch einen Stern bezeichnet.

Wenn man in diesen Karten die Pfeile nicht überall so gerichtet sieht, wie es dem Buijs-Ballotschen Gesetz entsprechen würde, so kann dies seinen Grund zum Teil darin haben, daß der Wind durch Gebirge abgelenkt wird, zum Teil auch darin, daß die Isobaren nicht so stark gekrümmt gezeichnet sind, wie es geschehen sein würde, wenn die Anzahl der Beobachtungsstationen größer gewesen wäre. Man kann daher diese Abweichungen nur als scheinbare Ausnahmen von der Regel betrachten.

Auf- und niedersteigende Luftströmungen.

§ 441. Die Strömungen im Luftmeer werden im wesentlichen durch die Wärme verursacht. Aber die Verhältnisse liegen hier anders als bei den Strömungen in Flüssigkeiten.

Je nachdem die unteren Schichten einer Flüssigkeit kälter, ebenso warm oder wärmer sind als die oberen Schichten, befindet sich die Flüssigkeit im stabilen, im indifferenten oder im labilen Gleichgewicht. Bringt man die kältere Flüssigkeit nach oben, so sinkt sie infolge ihres größeren spezifischen Gewichtes wieder nach unten. Ist die unterste Schicht der Flüssigkeit die wärmste, so kann das Gleichgewicht nur dann bestehen, wenn die Grenzfläche gegen die kältere Schicht eben und horizontal ist. Die geringste Erhöhung an der Grenzfläche zwischen der kälteren und der wärmeren Schicht hat zur Folge, daß die warme Flüssigkeit noch mehr steigt. Es erfolgt ein Durchbruch und die übrige warme Flüssigkeit folgt nach. Das Gleichgewicht ist also unbeständig (labil). Wenn die Flüssigkeit überall gleich warm ist, so befindet sie sich natürlich im indifferenten Gleichgewicht.

§ 442. Wird dagegen Luft von der Erdoberfläche in die Höhe gebracht, so kommt sie unter einen geringeren Druck und dehnt sich infolgedessen aus. Sie leistet also Arbeit und kühlt sich daher ab. Diese Abkühlung beträgt für 100 m ungefähr 1°. Hat nun die in der Höhe befindliche Luft dieselbe Temperatur, mit der die emporsteigende Luft ankommt, so wird diese nicht noch weiter steigen und auch nicht wieder herabsinken. Die Luft be-

[1]) Die deutsche Seewarte, die meteorologische Zentralstelle für Deutschland, wurde 1867 von v. Freeden als norddeutsche Seewarte begründet und 1875 in eine Reichsanstalt verwandelt.

Digitized by Google

findet sich also im indifferenten Gleichgewicht, wenn die Temperatur nach oben hin der Skala von 1° für je 100 Meter entsprechend abnimmt.

Ist die Luft unten kälter, als sie dieser Skala entsprechend sein müßte, so befindet sie sich im stabilen Gleichgewicht. Denn wenn sie nach oben gebracht würde, so würde sie kälter sein, als die oben befindliche Luft und würde also wieder herabsinken. Ist die Luft unten dagegen wärmer, als sie der Skala entsprechend sein müßte, so befindet sie sich im unbeständigen Gleichgewicht. Denn wenn sie in die Höhe kommt, so ist sie wärmer als die hier befindliche Luft und steigt infolgedessen noch weiter.

§ 443. Einen großen Einfluß auf diese Verhältnisse übt der Wasserdampfgehalt der Luft aus.

Wenn die Luft auf der Erdoberfläche nicht mit Wasserdampf gesättigt ist, so weicht sie in ihrem Verhalten nicht erheblich von trockener Luft ab. Ist sie aber an der Oberfläche gesättigt, oder hat sie infolge der beim Steigen eintretenden Abkühlung die Sättigungstemperatur (den Taupunkt) erreicht, so muß ein weiteres Steigen die Verdichtung von Wasserdampf zur Folge haben. Da aber hierdurch Wärme frei wird, so wird die mit Wasserdampf gesättigte Luft beim Steigen nicht so stark abgekühlt wie trockene Luft. Luft, die bei 0° mit Wasserdampf gesättigt ist, kühlt sich beim Steigen um 100 Meter nur um 0,63°, und Luft, die bei 20° gesättigt ist, nur um 0,45° ab. Wenn also die Luft von der Erdoberfläche in Gestalt einer vertikalen Säule in die Höhe steigt, so nimmt die Temperatur mit der Höhe nur langsam ab. Eine derartige Säule wird also in der Höhe oft wärmer sein als die Luft, in welche sie eindringt. Sie wird sich also nicht selten nach oben hin weiter verlängern und wird sich infolge der Ausscheidung des Wasserdampfes mit Nebel anfüllen, d. h. sie wird die Bildung von Wolken veranlassen.

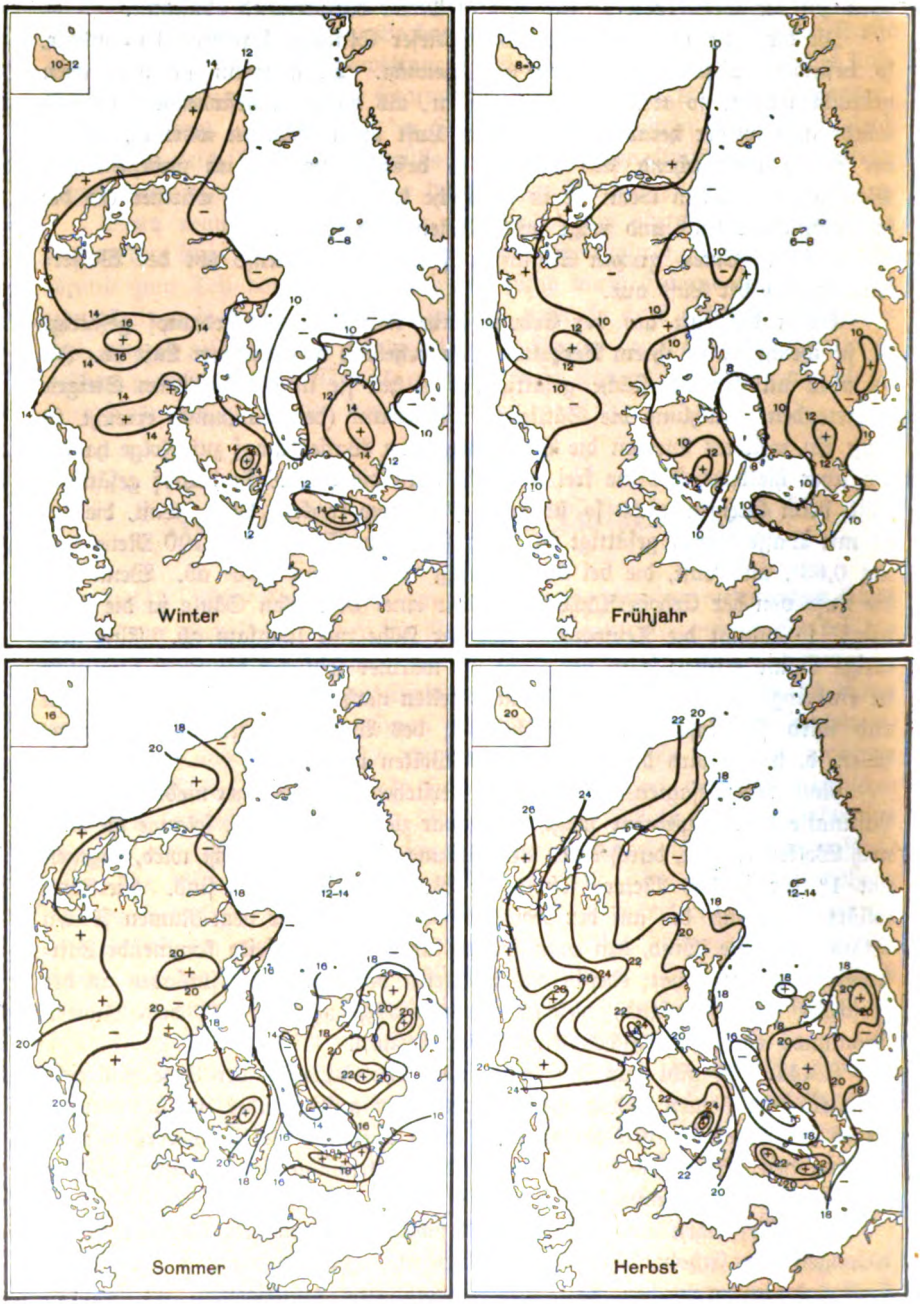
Nach dem Gesagten ist es leicht zu verstehen, daß bei einer niedersteigenden Luftmasse die Temperatur steigt, und zwar ziemlich langsam, solange die Luft noch Wolken enthält, durch deren Verdunstung Wärme verbraucht wird, dagegen um 1° für je 100 Meter, sobald die Wolken verschwunden sind. Hierdurch erklärt sich leicht der auf der Nordseite der Alpen unter dem Namen Föhn bekannte warme Wind, den man früher für eine aus Afrika kommende Luftströmung gehalten hat; ebenso das Auftreten von warmen Ostwinden an der Westküste von Grönland, welches Veranlassung gegeben hat, dem Innern Grönlands ein paradiesisches Klima zuzuschreiben.

§ 444. Es gibt nun in den verschiedenen Gegenden der Erde zahlreiche Beispiele von kleinen und großen Durchbrüchen aufsteigender Luftströmungen, die in der Regel mit viel größerer Heftigkeit auftreten als die niedersteigenden Strömungen. Jene sind in der Regel von Wolkenbildung und Niederschlägen, diese von heiterem Himmel begleitet.

Das Aufsteigen und Niedersteigen von Luftströmungen kann durch Erhöhungen der Erdoberfläche bewirkt werden. In Norwegen z. B. ist der Westwind im westlichen Teile des Landes eine aufsteigende, im östlichen Teile dagegen eine absteigende Luftströmung. Jene hat Wolkenbildung und

Digitized by Google

Fig. 374.



Verteilung der Niederschläge über Dänemark in den vier Jahreszeiten.

Digitized by Google

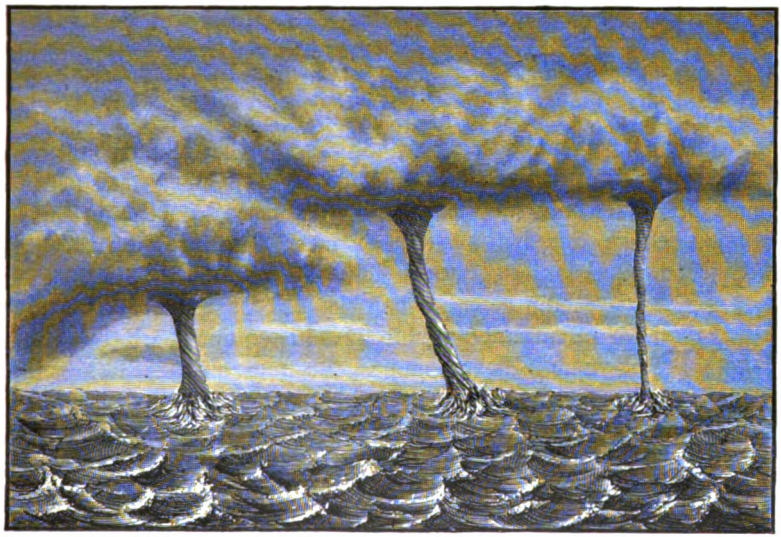
Niederschläge, diese wärmeres Wetter im Gefolge. Umgekehrt ist es mit dem Ostwind.

Der Regen wird natürlich um so stärker, je feuchter die Luft ist und je höher die Luftsäule steigt. Da in Nordeuropa westliche Winde häufiger und auch feuchter sind als östliche, hat Norwegen auf der Westseite der Gebirge viel mehr Regen (1000 bis 2000 mm) als auf der Ostseite (300 bis 600 mm).

Selbst die geringe Steigung über die Höhen Dänemarks macht sich in der Regenmenge deutlich bemerkbar, namentlich im Herbst, wenn die Luft dem Sättigungspunkt am nächsten ist und die Wolken in geringer Höhe entstehen (Fig. 374).

In ähnlicher Weise erklären sich die ungeheuren Regenfälle zur Zeit der Südwestmonsune in Vorderindien, z. B. an der Küste von Malabar (6000 mm) und am Abhang des Himalaja (bis 14 000 mm in wenigen Monaten).

Fig. 375.



Wasserhose auf dem Bodensee.

§ 445. Aber auch im freien Luftmeer gibt es zahlreiche Beispiele von aufsteigenden Luftströmungen. Eine derselben, nämlich die aufsteigende Luftströmung am Aquator, ist bereits erwähnt worden. Nachdem der Passat reichlich Wasserdampf aufgenommen hat, steigt er in die Höhe und gibt Veranlassung zu ungeheuren Regenfällen. Dies findet in einer langgestreckten Zone, und zwar vorzugsweise auf dem offenen Ozean statt. In anderen Fällen bilden die aufsteigenden Luftströmungen leicht größere oder kleinere Wirbel, deren Drehungsrichtung (auf der nördlichen Halbkugel der Uhrzeigerbewegung entgegengesetzt) durch das Buijs-Ballotsche Gesetz bestimmt wird.

Digitized by Google

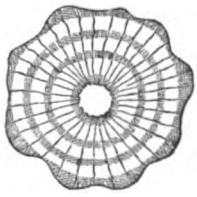
Der Charakter der Wirbel wird in hohem Grade von lokalen Verhältnissen und von den Jahreszeiten beeinflußt.

§ 446. In der Sahara, wo der Sand von den Sonnenstrahlen fast bis zum Siedepunkt des Wassers erwärmt wird, kann ein Durchbruch der unteren stark erhitzten Luft eintreten, die den Sand mit sich fortreißt und dadurch noch wärmer wird. Der entstehende Wind ist der Samum. Die Luft dieses Windes ist so trocken, daß das Einatmen derselben infolge der Austrocknung der Lungen den Tod herbeiführen kann. Hinsichtlich der Heftigkeit steht er weit hinter den tropischen Wirbelstürmen zurück, die aus feuchter Luft bestehen, wie die westindischen Orkane, die ostindischen und die chinesischen Teifune. Die durch Verdichtung des Dampfes freiwerdende Wärme bewirkt, daß der Wirbel eine riesige Höhe und infolgedessen eine Kraft erreicht, mit der er auf seinem Wege ungeheure Verwüstungen anrichten kann.

§ 447. Im kleinen können wir die Erscheinung oft im Sommer beobachten, wenn ein Wirbel einen staubigen Weg überschreitet und sich mit Staub füllt, oder wenn er die Halme eines Getreidefeldes in Bewegung setzt oder vielleicht auf einer Wiese einen Haufen Heu zerstreut. Auch wenn er sich über eine Wasserfläche hin bewegt, macht er sich durch seine saugende Wirkung bemerkbar.

Ein Gewitter ist nichts anderes als dieselbe Erscheinung im großen Maßstabe, in Verbindung mit Blitz, Donner, Regen und Hagel. Was die Entstehung des letzteren betrifft, so war es seit langer Zeit bekannt, daß man an einem Hagelkorn zuweilen abwechselnd mehr eisartige und mehr schneeartige Schichten unterscheiden kann (Fig. 376). Hieraus hatte man den Schluß gezogen, daß sich das Hagelkorn bei seiner Entstehung abwechselnd in kälterer und wärmerer Luft befunden haben müsse. Da nun die Hagelwetter in der Regel mit elektrischen Entladungen verbunden sind, so dachte man, daß sich die Hagelkörner infolge elektrischer Anziehung und Abstoßung zwischen zwei Wolken, einer positiv elektrischen und einer negativ elektrischen, hin und her bewegt hätten, bis sie schließlich so schwer geworden seien, daß sie durch die untere Wolke hindurch auf die Erde niederfallen mußten. Es ist sehr unwahrscheinlich, daß diese von Volta aufgestellte Theorie richtig ist. Wenn man aber bedenkt, mit welcher Kraft die Wirbelwinde schwere Gegenstände in die Höhe heben können, so ist es nicht zu verwundern, daß sie auch Hagelkörner mit sich führen können. In der Höhe entfernt sich die Luft nach allen Richtungen, der Wind wird schwächer und die Hagelkörner beginnen zu fallen. Bevor sie jedoch die Erde erreichen, werden sie vielleicht von neuem von der aufsteigenden Luft in den Wirbel hineingerissen, und dies kann sich vielleicht mehrmals wiederholen. Der Hagel fällt daher nicht in der Mitte des Wirbels nieder, sondern in einem weiteren Kreise, und wenn ein Hagelwetter über eine Gegend

Fig. 376.



Querschnitt durch ein Hagelkorn.

Digitized by Google

hingezogen ist, so liegt in der Regel der meiste Hagel in zwei Streifen zu beiden Seiten des Weges, den die Mitte des Wirbels genommen hat.

§ 448. Beim Betrachten der Wetterkarten wird man oft eine Stelle mit niedrigem Luftdruck bemerken, die von ziemlich regelmäßig verlaufenden ringförmigen Isobaren und infolgedessen von Winden umgeben ist, welche die Stelle annähernd umkreisen und sich der Stelle langsam nähern. Man hat es hier also mit einem großen Wirbel zu tun, dessen Durchmesser Hunderte von Meilen betragen kann. An einer Stelle mit hohem Luftdruck verlaufen die Isobaren in der Regel nicht kreisförmig, auch liegen sie nicht so dicht beieinander wie an einer Stelle mit niedrigem Luftdruck. An den Stellen mit niedrigem Luftdruck hat man sich einen aufsteigenden, an den Stellen mit hohem Luftdruck einen niedersteigenden Luftstrom zu denken. An den ersteren ist der Himmel bewölkt, an den letzteren heiter.

Die Verteilung des Luftdruckes ändert sich fortwährend, und zwar im allgemeinen am schnellsten an der Stelle des Minimums. Dieses ändert seine Lage von Tag zu Tag. In unseren Gegenden bewegt es sich in der Regel von Westen nach Osten (s. Fig. 371 bis 373). Ein solcher Wirbelwind bringt uns zunächst Südwind. Wenn er nördlich an uns vorüberzieht, so dreht sich der Wind von Süden nach Westen und weiter. Zieht er dagegen südlich an uns vorüber, z. B. über Frankreich und Deutschland, so dreht sich der Wind bei uns von Süden nach Osten. In diesem Falle hat man zuerst in England, dann bei uns und zuletzt in St. Petersburg Ostwind, also die Erscheinung die man früher als Saugwind bezeichnete (vgl. § 436).

§ 449. Anfangs glaubte man, die Wanderung dieser Wirbel sei eine Folge davon, daß in diesen Gegenden die Luftströmung, in welcher die Wirbel gewissermaßen schwimmen, vorwiegend von Westen nach Osten gerichtet ist. In neuerer Zeit ist es aber von Professor Mohn (geb. 1835) in Christiania nachgewiesen worden, daß die Verschiebung des Wirbels die Folge einer fortwährenden Neubildung ist. An derjenigen Seite des Wirbels, wo dieser warme und feuchte Luft aufnimmt, bildet sich sozusagen ein neues Wirbelzentrum. In unseren Gegenden ist es namentlich der Südwind, welcher warm und feucht ist, und da dieser auf der Ostseite des Wirbels weht, so schreitet dieser in der Richtung nach Osten fort. Die Ostseite des Wirbels ist also die „Vorderseite". Die kühlen Nordwinde dagegen, die auf der „Rückseite" wehen, vernichten hier den Wirbel. Hiermit steht es auch in Einklang, daß an der Vorderseite des Wirbels Regenwetter, an der Rückseite dagegen heiteres Wetter herrscht.

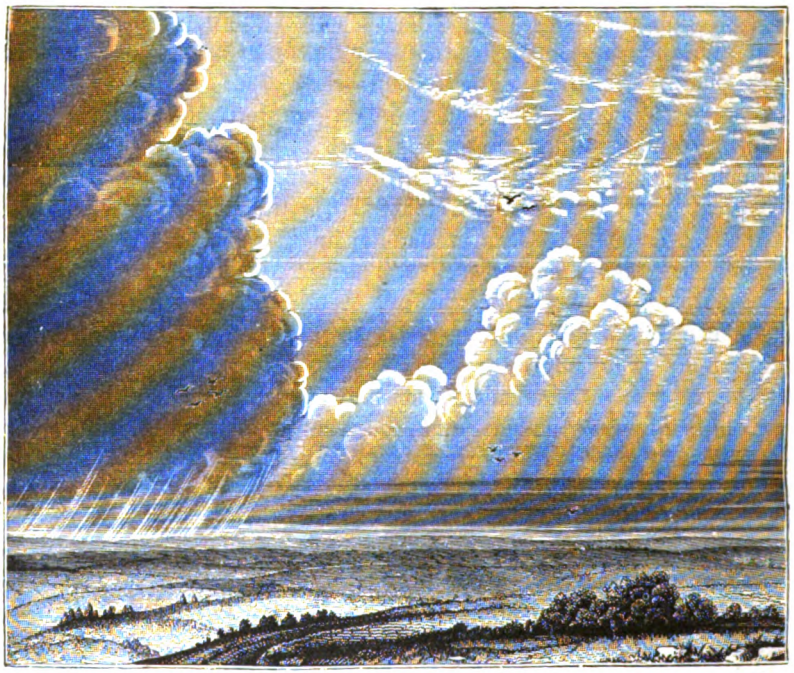
Ganz ähnlich verhält es sich mit der Bewegung der Gewitter. Sie folgen bekanntlich nicht der Windrichtung, sondern bewegen sich oft in der entgegengesetzten Richtung, indem sie dahin vordringen, wo sie Nahrung für Neubildung finden, namentlich wo viel Wasserdampf vorhanden ist. Ebenso ist es bekannt, daß die Gewitter in vielen Gegenden oft einen ganz bestimmten Weg, namentlich durch sumpfige und wasserreiche Gegenden einschlagen.

Digitized by Google

§ 450. Abgesehen von der wichtigen Rolle, welche die Wärmebindung und Wärmeerzeugung der Wasserdämpfe als Triebkraft für die Bewegungen des Luftmeeres spielen, wird die Wetterlage und die Himmelsansicht vorzugsweise durch den Wasserdampf und seine Verdichtung bestimmt.

Die unendlich mannigfaltigen Formen der Wolken hat man in ein System zu bringen versucht. Namentlich der englische Meteorologe Luke Howard (1772 bis 1864) hat eine Bezeichnungsweise eingeführt, die im wesentlichen auch heute noch allgemein in Gebrauch ist.

Fig. 377.



Die Hauptformen der Wolken.

Die Hauptformen sind die Federwolke (cirrus), die Haufenwolke (cumulus), die Schichtwolke (stratus), sowie die Regenwolke (nimbus), Fig. 377. Außer diesen Hauptformen gibt es zahlreiche Abänderungen und Übergangsformen.

§ 451. Man hat sich früher darüber gewundert, daß die Wolken trotz ihres massiven Aussehens in der Luft schweben können, ohne zu sinken. Namentlich die Haufenwolken treten in anscheinend schweren Formen auf, die undurchsichtig sind und starke Schatten werfen. Diese Wolken mit ebener Unterseite und kuppelförmig gewölbter Oberseite schweben am blauen Himmel, ohne die geringste Bewegung nach der Erde hin erkennen zu lassen.

Digitized by Google

Früher glaubte man, um diese Erscheinung zu erklären, annehmen zu müssen, die in der Luft schwebenden Wasserteilchen seien keine massiven Tröpfchen, sondern kleine Bläschen, die ebenso wie Seifenblasen nur sehr langsam sinken. Aber abgesehen davon, daß solche kleine Bläschen wegen des großen Druckes, der in der Oberfläche nach innen wirkt, nicht bestehen können, ist die Annahme ihrer Existenz auch ganz überflüssig, da man sich Wassertröpfchen ganz gut so klein vorstellen kann, daß der Widerstand, den die Luft ihrem Fallen entgegensetzt, ebensogroß wie ihr Gewicht ist, und zwar schon bei einer ganz unbedeutenden Fallgeschwindigkeit. Wenn dann ein ebenso schnelles Aufsteigen stattfindet, so sinken die Tropfen überhaupt nicht. Läßt man nämlich die Tropfen in Gedanken kleiner und kleiner werden, so nimmt ihre Oberfläche und also auch der Luftwiderstand nur im Verhältnis der zweiten Potenz, das Gewicht dagegen im Verhältnis der dritten Potenz des Durchmessers ab. Man kann daher durch Annahme einer hinreichend geringen Größe der Tropfen jeden beliebigen auch noch so geringen Wert der Fallgeschwindigkeit erreichen.

Nun findet bei der Bildung der Haufenwolken ein langsames Aufsteigen statt, und gerade dieses Aufsteigen ist die Ursache der Wolkenbildung. Namentlich vormittags beginnt die erwärmte Luft an einzelnen Stellen zu steigen. In einer gewissen Höhe beginnt die Verdichtung (§ 443), und hier entsteht die horizontale Grundfläche der Haufenwolke.

Daß die Wolke einen so massiven Eindruck macht, hat seinen Grund gerade in der geringen Größe der Tropfen. In dem Hals einer frisch entkorkten Bierflasche kann man nicht selten einen so dichten Nebel beobachten, daß man nicht bis auf die Oberfläche der Flüssigkeit hinabsehen kann. Dieser Nebel entsteht, wenn die Luft unter dem Kork stark verdichtet war, infolge der Ausdehnung und der mit dieser verbundenen Abkühlung. Ebenso wie dieser Nebel besteht auch eine Haufenwolke aus einem Gewimmel zahlloser Tröpfchen, durch das ein Lichtstrahl nicht geradlinig hindurchdringen kann, während eine Masse großer Regentropfen für sein Fortschreiten kein wesentliches Hindernis bildet.

Wenn die Wolkenmassen sehr hoch schweben, so finden die Tröpfchen Zeit, sich zu größeren Tropfen zu vereinigen. Ein solcher fällt dann schneller, vereinigt sich mit anderen und wächst bis zu einer gewissen Regentropfengröße an. Diese Größe kann nicht wesentlich überschritten werden, ohne daß der Tropfen unter dem Widerstand der Luft in kleinere Tropfen zerfällt.

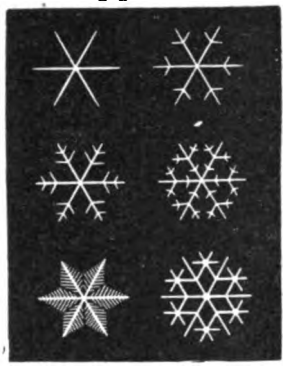
Ein weiterer Grund, weshalb man die Wasserteilchen der Wolken für Bläschen hielt, war der Umstand, daß man in einer Haufenwolke im allgemeinen keinen Regenbogen sieht, auch wenn sich die Sonne und das Auge an der richtigen Stelle befinden. Jetzt nimmt man an, daß die Wassertröpfchen so klein sein können, daß sie nicht in der Weise auf die Lichtstrahlen einwirken, wie es bei der Entstehung des Regenbogens der Fall ist (vgl. I, § 387). Die Lichtstrahlen können so miteinander interferieren, daß sie nicht

Digitized by Google

in der Weise aus den Tropfen austreten, wie es für die Bildung des Regenbogens erforderlich ist.

§ 452. Wenn sich Luftmassen von verschiedener Temperatur, die mit Wasserdampf gesättigt sind, vermischen, so ist das Gemisch übersättigt. Die Menge Wasserdampf z. B., welche in einem Cubikmeter Luft von 0° und in einem Cubikmeter Luft von 20° enthalten sein kann, $4{,}6 + 17{,}4 = 22\,g$ (vgl. die Tabelle auf S. 464), kann nicht in zwei Cubikmeter Luft von 10° enthalten sein, da diese Luftmenge nur $2 \times 9{,}2 = 18{,}4\,g$ Wasserdampf enthalten kann. Bei der Vermischung muß also Verdichtung von Wasserdampf stattfinden. Eine derartige Luftvermischung findet in der Natur häufig statt, z. B. wenn sich die Luft um einen schwimmenden Eisberg mit der Seeluft vermischt, oder wenn die warme feuchte Luft über einer sumpfigen Gegend nach einem warmen Sommertage sich mit der kalten Nachtluft vermischt. In ähnlicher Weise entstehen ohne Zweifel oft Wolken, wenn sich Luftmassen von verschiedener Temperatur berühren und vermischen.

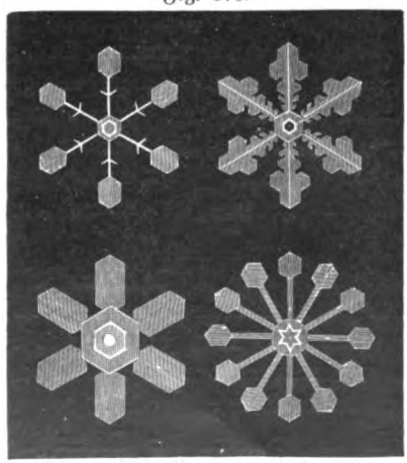
Fig. 378.



Schneekristalle.

§ 453. Die Entstehung des Regens ausschließlich durch diese Art der Wolkenbildung zu erklären, ist jedoch nicht gut möglich. Selbst wenn die Vermischung der Luftmassen von verschiedener Temperatur eine vollkommene wäre, was sie jedenfalls in den meisten Fällen nicht ist, und wenn sie auch in einer hinreichenden Höhe stattfände, könnte die ausgeschiedene Wassermenge doch nur einen geringen Teil der Regenmenge bilden, die z. B. während eines Gewitters niederfällt. Dagegen reicht die Verdichtung, welche stattfindet, wenn ein einigermaßen gesättigter Luftstrom in die Höhe steigt, vollständig aus, um die Menge des fallenden Regens zu erklären, zumal bei diesem Vorgang fortwährend neue Luftmassen emporgehoben werden und während des Steigens ihren Wasserdampf in Form von Regentropfen abgeben.

Fig. 379.



Schneekristalle.

§ 454. Wenn da, wo die Verdichtung stattfindet, die Temperatur der Luft unter dem Gefrierpunkt liegt, so entstehen natürlich keine Tröpfchen, sondern Eiskriställchen, die bei weiterer Verdichtung größer werden und sich verzweigen. Die zusammengesetzten Kristalle haben im allgemeinen die Form

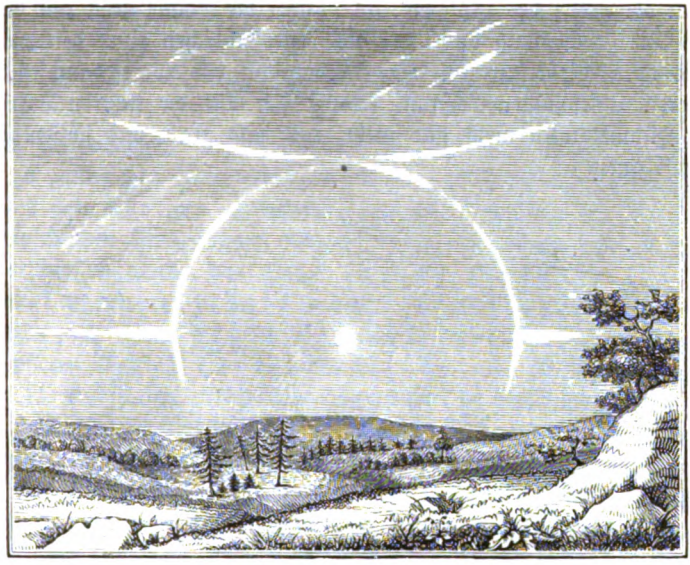
Digitized by Google

eines ſechsſtrahligen Sternes. Die Mannigfaltigkeit dieſer Formen wird wahrſcheinlich durch die Verſchiedenheit der Temperatur, des Luftdruckes, der Windſtärke u. ſ. w. bedingt.

Wenn die Kriſtällchen zuſammenſtoßen, ſo wird die regelmäßige Form derſelben zerſtört, und wenn ſie beim Fallen in wärmere Luftſchichten kommen, ſo ballen ſie ſich zu größeren Schneeflocken zuſammen.

§ 455. Die ſog. Nebenſonnen und Ringe um die Sonne und um den Mond werden durch Eiskriſtällchen erzeugt, die in den höheren Luftſchichten

Fig. 380.



Ringe um die Sonne.

ſchweben. Sie dürfen nicht mit den Interferenzringen verwechſelt werden, die durch leichte Wolken erzeugt werden, durch die man die Sonne oder den Mond erblickt und die einen Durchmeſſer von 2 bis 6° haben.

Ein großer Ring um die Sonne oder den Mond hat einen Durchmeſſer von 22°. Ein anderer, welcher ſeltener zu beobachten iſt, hat ungefähr den doppelten Durchmeſſer. Der erſtere Winkel iſt derjenige, um den ein Lichtſtrahl abgelenkt wird, wenn er durch ein Eisprisma ſo hindurchgeht, daß der brechende Winkel gleich 60° iſt, der letztere derjenige, um den ein Lichtſtrahl abgelenkt wird, wenn der brechende Winkel gleich 90° iſt. Wenn die Luft mit Eiskriſtällchen angefüllt iſt, die ſich in allen möglichen Stellungen befinden, ſo werden diejenigen, welche ſich in bezug auf die Sonnenſtrahlen und das Auge in der richtigen Stellung befinden, Licht in das Auge ſenden. Da die roten Lichtſtrahlen am wenigſten abgelenkt werden, iſt an beiden Ringen der innere Rand rot und der äußere violett.

Digitized by Google

Da die Schneekristalle verschiedene Formen haben und während des Fallens eine bestimmte Stellung einnehmen können, so entstehen zuweilen außer den beiden Hauptringen noch andere ringförmige und geradlinige Lichtstreifen, und zwar infolge der Reflexion des Lichtes an den Flächen der Eiskriställchen. Da wo sich die verschiedenen Lichtstreifen schneiden, ist der Glanz am stärksten. An diesen Stellen entstehen die sog. Nebensonnen, am häufigsten da, wo der innere Sonnenring von dem horizontalen Streifen geschnitten wird.

Die Erscheinung ist gerade keine Seltenheit, aber sie wird in vielen Fällen nicht beobachtet, weil der Himmel an der betreffenden Stelle stark leuchtet und das Auge durch das Licht geblendet wird. Um sie zu beobachten, muß man die Stelle des Himmels, an welcher die Sonne steht, mit der Hand bedecken. Die Erscheinung bildet oft das erste Anzeichen eines herannahenden Gewitters oder Wirbelsturmes. Die Verdichtung des Wasserdampfes, die in den höheren Luftschichten beginnt, pflanzt sich auf die tieferen Luftschichten fort, der Himmel wird mehr und mehr weiß und grau, und schließlich fängt es an zu regnen.

Digitized by Google

Nachtrag.

(Zu Seite 439.)

Die Radioaktivität.

Die Entdeckungen von Crookes, Lenard und Röntgen gaben den Anstoß zu zahlreichen Untersuchungen, welche in erster Linie bezweckten, die Natur der von Röntgen entdeckten X-Strahlen aufzuklären, die aber dann zu überraschenden Entdeckungen führten, durch die ein ganz neues Gebiet der Physik erschlossen wurde, das Gebiet der Radioaktivität.

Henri Becquerel in Paris machte 1896 die Entdeckung, daß es gewisse Substanzen gibt, welche die Eigenschaft haben, ununterbrochen und ohne irgend einen äußeren Einfluß eine eigentümliche Art von Strahlen auszusenden. Becquerel untersuchte verschiedene fluoreszierende Substanzen, um die Annahme, daß die Fluoreszenz des Glases einer Crookesschen Röhre unter dem Einfluß des Anprallens der Kathodenstrahlen die Ursache der X-Strahlen sei, auf ihre Richtigkeit zu prüfen. Er ließ zu diesem Zwecke fluoreszierende Uranverbindungen auf eine in lichtdichtes Papier eingewickelte photographische Platte einwirken, indem er die betreffende Uranverbindung der Einwirkung des Sonnenlichtes aussetzte, um sie fluoreszierend zu machen, und die erwartete Wirkung trat tatsächlich ein. Allein bei weiteren Versuchen zeigte es sich alsbald, daß dieselbe Wirkung auch im Dunkeln stattfindet, selbst wenn Uranverbindungen benutzt wurden, die im Dunkeln dargestellt und aufbewahrt worden waren. Es zeigte sich ferner, daß dieselbe Wirkung auch mit nicht fluoreszierenden Uranverbindungen erreicht wird. Es handelte sich also um eine ganz neue Eigenschaft des Urans, die mit der Fluoreszenz nichts zu tun hat, die Eigenschaft, welche man jetzt als Radioaktivität bezeichnet. Die von den Uranverbindungen ausgehenden Strahlen zeigen in ihrem Verhalten große Ähnlichkeit mit den X-Strahlen. Diese Entdeckung legte natürlich die Frage nahe, ob es außer dem Uran noch andere „radioaktive" Elemente gibt. Eine eingehende Untersuchung, welche von Frau S. Curie[1]) ausgeführt wurde und die sich auf alle bekannten Elemente erstreckte, führte zu dem Resultat,

[1]) S. Curie, Recherches sur les substances radio-actives, Paris 1903; deutsch von Kaufmann, Braunschweig 1904.

Digitized by Google

daß von diesen Elementen nur noch eins, das Thor, die Eigenschaft der Radioaktivität besitzt. Die Haupteigenschaften, durch welche sich die von den radioaktiven Elementen ausgehenden unsichtbaren Strahlen bemerklich machen, bestehen darin, daß sie auf die photographische Platte wirken, und daß sie die Luft und andere Gase, durch die sie hindurchgehen, ionisieren, d. h. vorübergehend zu Leitern der Elektrizität machen.

Was die Natur der verschiedenen Strahlenarten betrifft, so haben umfangreiche Untersuchungen, auf deren Einzelheiten hier nicht eingegangen werden kann, zu den folgenden Ergebnissen geführt. Die Kathodenstrahlen werden nicht, wie die Lichtstrahlen, durch Ätherschwingungen erzeugt, sondern sie sind materieller Natur, d. h. sie werden dadurch erzeugt, daß von der Kathode Teilchen, die kleiner als die kleinsten bekannten Atome sind und die man als Atome negativer Elektrizität (negative Jonen) bezeichnen kann, fortgeschleudert werden. Es ist auch gelungen, die Geschwindigkeit und die Masse dieser Teilchen zu bestimmen. Die erstere ist gleich dem zehnten Teil der Lichtgeschwindigkeit und die letztere gleich $^1/_{700}$ der Masse des Wasserstoffatoms. Die X-Strahlen bestehen wie das Licht aus Ätherwellen. Der Unterschied der beiden Strahlungen besteht wahrscheinlich darin, daß der X-Strahl einen stoßartigen Charakter hat, während der gewöhnliche Lichtstrahl aus einer regelmäßigen Folge gleichartiger Schwingungen besteht. Was schließlich die von den radioaktiven Substanzen ausgehenden Strahlen betrifft, so zerfallen diese in drei verschiedene Arten, die man als α-Strahlen, β-Strahlen und γ-Strahlen bezeichnet.

Die α-Strahlen besitzen ein geringes Durchdringungsvermögen. Sie werden von einem Blatt Papier oder einer Luftschicht von 2 bis 3 cm Dicke zurückgehalten. Sie werden vom Magneten abgelenkt, aber in geringerem Grade als die β-Strahlen und nach der entgegengesetzten Seite wie diese und die Kathodenstrahlen. Die Teilchen, aus denen sie bestehen, besitzen ungefähr die Masse eines Wasserstoffatoms und sie werden von den radioaktiven Substanzen mit der riesigen Geschwindigkeit von 30 000 km per Sekunde fortgeschleudert. Die β-Strahlen gehören demselben Typus an wie die Kathodenstrahlen, besitzen aber eine geringere Geschwindigkeit und ein stärkeres Durchdringungsvermögen als diese. Sie werden wie die Kathodenstrahlen vom Magneten abgelenkt und gehen wie die X-Strahlen durch ein dünnes Metallblättchen und durch Glas hindurch, werden aber von einer Metallplatte von der Dicke einer Münze zurückgehalten. Sie üben von allen drei Strahlenarten die stärkste photographische Wirkung aus. Die γ-Strahlen endlich besitzen das stärkste Durchdringungsvermögen. Sie gehen durch eine Säule von zwölf Münzen hindurch, ohne vollständig absorbiert zu werden. Sie werden vom Magneten nicht abgelenkt und stehen zu den β-Strahlen in einem ähnlichen Verhältnis wie die X-Strahlen zu den Kathodenstrahlen.

Von den zahlreichen Untersuchungen auf dem Gebiete der Radioaktivität sind besonders diejenigen hervorzuheben, welche zur Entdeckung des Radiums und zur Aufklärung seiner chemischen Natur geführt haben. Frau Curie

Digitized by Google

beobachtete, daß manche uran- und thorhaltige Mineralien, namentlich die Pechblende, eine ganz bedeutend höhere Aktivität besitzen als Uran und reine Uranverbindungen. So ist die Pechblende von Johanngeorgenstadt, die ungefähr 70 Proz. Uran enthält, nahezu viermal so stark aktiv als die aktivste Uranverbindung. Diese Beobachtungen ließen vermuten, daß die Radioaktivität durch ein bis dahin unbekanntes Element hervorgerufen wird, und es handelte sich jetzt darum, dieses Element zu isolieren. Zu diesem Zwecke unterwarfen Herr und Frau Curie die Pechblende einer gründlichen chemischen Analyse, und es gelang ihnen, reines Radiumchlorid darzustellen, welches zur Bestimmung des Atomgewichtes und zur Beobachtung des Spektrums benutzt wurde. Die erstere wurde von Frau Curie, die letztere von Demarçay ausgeführt. Um die zu diesen Untersuchungen erforderliche Menge Radiumchlorid zu gewinnen, mußten riesige Mengen Pechblende verarbeitet werden, da man aus einer Tonne des Materials nur einige zehntel Gramm Radiumchlorid erhält. Für das Atomgewicht des Radiums fand Frau Curie den Wert 225. Das Radium hat also nächst dem Thor (232) und dem Uran (238) von allen bekannten Elementen das größte Atomgewicht. Nach seinem chemischen Verhalten und namentlich auch nach der Beschaffenheit seines Spektrums gehört es zur Gruppe der Erdalkalimetalle.

Während also das Radium eine Reihe von Eigenschaften besitzt, durch die ihm sozusagen im periodischen System der Elemente ein reservierter Platz angewiesen wird, besitzt es außerdem noch andere Eigenschaften, die es als eine der merkwürdigsten Substanzen erscheinen lassen, welche man kennt. Die Strahlungen des Radiums sind sehr kräftig, selbst wenn die Menge des Materials nur wenige Milligramm beträgt. Die α-Strahlen entladen augenblicklich ein Elektroskop und erregen starke Szintillation, wenn sie auf einen Schirm aus Zinksulfid anprallen (Spintharisкop von Crookes). Diese Strahlen bilden die Hauptursache der Wärmeentwickelung des Radiums. Sie besitzen einerseits eine große kinetische Energie und andererseits ein geringes Durchdringungsvermögen, so daß sie zum größten Teil von den festen Radiumverbindungen absorbiert werden, wodurch ihre Energie in Wärme umgewandelt wird. Die Temperatur einer Radiumverbindung übersteigt die Temperatur der Umgebung stets um einige Grad, und die in einer Stunde entwickelte Wärme würde hinreichen, eine gleich große Menge Wasser vom Gefrierpunkt bis zum Siedepunkt zu erwärmen. Die β-Strahlen durchdringen Metallplatten von der Dicke einer Visitenkarte, wirken stark auf die photographische Platte und bringen Baryumplatincyanür zum Fluoreszieren. Sie führen eine negative Ladung fort, infolgedessen das Radium positiv geladen wird. Man hat beobachtet, daß zugeschmolzene Röhren, in denen Radiumpräparate aufbewahrt wurden, nach und nach so stark geladen wurden, daß sie zersprangen und daß das Zerspringen von einem elektrischen Funken begleitet war. Die γ-Strahlen wirken auf die photographische Platte, dringen durch eine Metallplatte von mehreren Centimetern Dicke hindurch und bringen einen Baryumplatincyanürschirm zum Fluoreszieren. Endlich ist von den Eigenschaften des

Digitized by Google

Radiums noch hervorzuheben, daß es fortwährend ein radioaktives Gas, die sogenannte Radiumemanation, ausstrahlt. Diese Emanation gehört zu den verbreitetsten Substanzen.

Die Pechblende enthält außer dem Radium noch zwei andere radioaktive Elemente, das Polonium und das Aktinium, deren Eigenschaften aber noch wenig erforscht sind.

Eine der interessantesten Tatsachen, die auf dem Gebiete der Radioaktivität entdeckt wurde, ist die Beziehung, in welcher das Radium zum Helium steht. Das Vorkommen des Radiums in uran- und thorhaltigen Mineralien, sowie der Umstand, daß sich die gasförmige Emanation von Thor und Radium unter Umständen in den Verbindungen ansammelt, ohne zu entweichen, führten Rutherford und Soddy zu der Vermutung, daß zwischen Radium und Helium ein gewisser Zusammenhang besteht, und es gelang Ramsay und Soddy (1903) tatsächlich, festzustellen, daß sich die Radiumemanation in Helium verwandelt.

Zur theoretischen Erklärung der Erscheinungen der Radioaktivität stellten die genannten Forscher die Theorie des Atomzerfalls auf. Nach dieser Theorie befinden sich die Elemente, welche die Eigenschaft der Radioaktivität besitzen, in einem Entwickelungsprozeß, durch den sie sich in leichtere und beständigere Formen verwandeln, und die von diesen Elementen ausgehenden Strahlungen werden dadurch erzeugt, daß von den Atomen der ursprünglichen Substanz fortwährend ein gewisser Bruchteil zerfällt.

Wer sich über die Erscheinungen der Radioaktivität, namentlich auch über die Art und Weise, wie die erwähnten Resultate erreicht worden sind, genauer unterrichten will, muß auf Spezialwerke über diesen Gegenstand verwiesen werden. Empfehlenswerte Werke sind u. a. Hofmann, Die radioaktiven Stoffe, 2. Aufl., Leipzig 1904 und Soddy, Die Radioaktivität, Leipzig 1904.

G. Siebert.

Digitized by Google

Alphabetisches Register.

A.

Absorption der Wärme 138.
Abweichung der Magnetnadel 197.
Accademia del Cimento 13, 39, 40.
Äolipile 54.
Aepinus 207.
Akkumulator 421.
Albertus Magnus 347, 366.
Amontons 35.
Ampère 389, 392.
Ampèresches Gestell 390.
Anaxagoras 337.
Anaximander 336.
Anaximenes 336.
Andrews 343.
Anemometer 466.
Aneroidbarometer 459.
Anthemius 35.
Antinori 19.
Arago 389, 392, 404.
Aristoteles 52, 191, 251, 338.
Atomgewichte 361, 364.
Atomtheorie 360.
Ausdehnung der Luft 7, 35, fester Körper 27, der Flüssigkeiten 32, des Quecksilbers 33, des Wassers 34.
Auslader 268, 308.
Avicenna 346.
Avogadro 363.

B.

Bacon, F. 126.
Bacon, R. 348.
Banks 324.
Barometer 457.
Basilius Valentinus 349.
Batterie, elektrische 273.
Beccaria 283, 303.
Becher 355, 456.
Becherapparat 326.
Becquerel 379.
Bennet 291, 322.
Bernoulli 106, 113.
Berthelot 78.
Berthollet 367, 375.
Berzelius 371.
Biot 154.
Black 45, 48, 49, 74.
Blitzableiter 280, 284.
Bogenlampe 426.
Borelli 14.
Bouguer 23.
Boulton 91.
Boyle 20, 39, 40, 61, 79, 255, 352, 366.
Branca 56.
Breguet 31.
Buijs-Ballotsches Gesetz 472.
Bunsensches Element 381.

C.

Cailletet 343.
Canton 274.
Carlisle 328, 367.
Carnot 162, 178.
Caus, de 57, 72.
Cavallo 290.
Cavendish 298, 355.
Cawley 69.
Celsius 22, 220.
Cesariano 55.
Christiansen 156.
Chronometer 32.
Clausius 181, 187, 376.
Colding 172, 177.
Collinson 271.
Columbus 197.
Coulomb 208, 292.
Crookes 432.

Digitized by Google

Cugnot 116.
Cullen 45, 77.

D.

Dalton 81, 360.
Dampf 52, 72, 73.
Dampfdruck 83, 97, 186.
Dampfkessel 62.
Dampfmaschine 60, 64, 67, 90, 93.
Dampfpumpe 64, 66.
Dampfschiff 106.
Dampfturbine 55.
Dampfvolum 57.
Dampfwagen 116.
Daniellsches Element 380.
Davy 128, 130, 158, 178, 369, 426.
Deklination 197, 227.
De la Rive 426.
Della Porta 41, 57, 204.
Deluc 22, 45.
Demokrit 337.
Destillation 340, trockene 344.
Diamagnetismus 393.
Dielektrika 302.
Differentialthermometer 136.
Drebbel 8.
Drehwage 209, 292.
Dubois-Reymond 311.
Dufay 260.
Dulong und Petit 32.
Duplikator 322.
Duter 302.
Dynamomaschine 411.

E.

Edison 424.
Eismaschine 78.
Elektrischer Ofen 379.
Elektrische Schelle 394.
Elektrisiermaschine 254, 263 fg., 289.
Elektrizität, tierische 311.
Elektrodynamik 390.
Elektrolyse 373.
Elektromagnetismus 382, 390.
Elektromotorische Kraft 327, 332.
Elektrophor 303.
Elektroskop 290.
Elemente, chemische 338, 354, 361.
Elemente, galvanische 380 fg.
Erdmagnetismus 199, 202, 216, 225, 242.
Ericson 73.
Ericsson 118, 122.
Euler 220.
Evans 117.
Expansion 100.
Exzentrische Scheibe 95.

F.

Fahrenheit 21, 42.
Faraday 128, 130, 298, 300, 342, 372, 393, 405, 419, 431.
Faure 421.
Feddersen 307.
Feuchtigkeit der Luft 461.
Feuerbohrer 2.
Fitch 108.
Fjord 160.
Flemlöse 456.
Flugrad, elektrisches 278.
Foucault 426.
Franklin 153, 269, 273, 277 fg., 287, 308.
Franklinsche Tafel 269.
Fraunhofer 144.
Fresnel 151.
Fulton 109.
Funken, elektrischer 306.
Funkeninduktor 456.

G.

Galenos 347.
Galilei 8, 38.
Galvani 315 fg., 323.
Galvanoplastik 377.
Galvanostegie 378.
Gauß 237, 241.
Gautherot 330.
Gauthier 107.
Geber 345.
Gefrieren des Wassers 40.
Geißlersche Röhren 431.
Gellibrand 216.
Gewitter 279, 480.
Gilbert 200, 225, 246, 252.
Gioja 196.
Gletscher 45.
Glühlampe 424.
Goldblattelektroskop 291.
Graham 219.
Gralath 266, 274, 306, 310.
Grammesche Maschine 416.
Gray 51, 257.
Grotthuß 367, 374.
Grovesches Element 381.
Guericke 254, 306.

Digitized by Google

H.

Hadley 471.
Hagel 480.
Hales 356.
Halley 20, 72, 217, 470.
Hamberger 72.
Hansteen 221 fg.
Harrison 30.
Hartmann 198.
Hawksbee 257, 306.
Heißluftmaschine 114.
Helmont, van 72, 350.
Henley 265, 307.
Hermes Trismegistos 339.
Heron 6, 38, 53, 125.
Herschel 144, 151.
Hertz 434.
Hittorf 375, 432.
Hochdruckmaschine 70, 98.
Hooke 32, 67, 457, 466.
Howard 482.
Hufeisenmagnet 215.
Hughes 445, 450.
Humboldt, A. 238, 241.
Huygens 20, 61, 457.
Hygrometer 462.

I.

Jacobi 377, 398.
Indikator 101.
Indikatordiagramm 102.
Induktion 404.
Influenzmaschine 304.
Ingenhouß 153.
Inklination 199, 233.
Jolly 171.
Joule 174 fg., 181, 423.
Isobaren 469.
Isodynamen 235.
Isogonen 226.
Isoklinen 234.
Isothermen 469.

K.

Kältemischungen 41.
Kalium 370.
Kalorimeter 50.
Kapazität 298.
Kathetometer 51.
Kathodenstrahlen 432.
Kelvin, Lord 247.
Kepler 194.
Kienmayer 265.
Kinnersley 308.
Kircher 36.
Kleist 266.
Koerzitivkraft 211.
Kohärer 446.
Kondensator 89, 321.
Konduktor 263.
Kraftlinien 298, 390.
Kratzenstein 72, 310.
Kreisprozeß 162.
Kritische Temperatur 343.

L.

La Cour 447.
Ladungssäule 331.
Längenausdehnung 29.
Lambert 132, 153.
Landriani 329.
Lanesche Maßflasche 291.
Laplace 28.
Latente Wärme 48; des Dampfes 76.
Lavoisier 28, 357.
Leclanchésches Element 361.
Leidener Flasche 267, 271.
Leiter, gute und schlechte 259.
Lenard 435.
Leslie 135.
Leukippos 337.
Libau 350.
Libri 19.
Lokomotive 120.
Longomontanus 456.
Luftthermometer 9, 24.
Lukrez 192.

M.

Magalotti 16, 60.
Magnetelektrische Maschine 410.
Magnetinduktion 405.
Magnetischer Wagen 194.
Magnetische Verteilung 214.
Magnetismus 191.
Magnetstein 192.
Marconi 447.
Mariani 19.
Mariotte 132.
Marsili 14.
Maßflasche 291.
Maximum- und Minimumthermometer 25.
Mayer, R. 167, 177.
Mayer, T. 221.
Mayow 352.
Melloni 141, 151.

Digitized by Google

Metallthermometer 31.
Metallverwandlung 339.
Mikrophon 451.
Minimum, barometrisches 472, 481.
Mohn 481.
Molekulargewicht 363.
Monsune 471.
Morse 442.
Mousson 42.
Multiplikator 143, 387.
Musschenbroek 267.

N.

Nadeltelegraph 441.
Natrium 370.
Natterer 342.
Nebensonnen 485.
Neigung der Magnetnadel 199.
Newcomen 67.
Nicholson 328, 367.
Niederdruckmaschine 96.
Nobili 141, 387.
Nörremberg 171.
Noëssche Thermosäule 396.
Nollet 268, 310.
Norman 198, 216.

O.

Oersted 383, 392, 416.
Ofen, elektrischer 379.
Ohm 397.
Ohmsches Gesetz 400.
Oliva 16.
Olszewski 344.
Olympiador 340.
Oszillator 447.

P.

Pacinotti 411.
Papin 61, 70, 74.
Papinscher Topf 63.
Paracelsus 349.
Passatwinde 470.
Pendel, elektrisches 261.
Phlogiston 355.
Phonotelegraph 448.
Pictet 133.
Pixii 408.
Planté 421.
Platon 191.
Plinius 192.
Poggendorff 387.
Potential 296.
Potter 69.
Pouillet 149, 375, 388.
Prevost 133.
Priestley 356.
Pyrheliometer 149.

Q.

Quadrantenelektrometer 265.

R.

Ramsden 265.
Réaumur 22.
Redi 16.
Regenmesser 461.
Regnault 84.
Reibzeug der Elektrisiermaschine 263.
Reimarus 283.
Reis 448.
Renaldini 15, 21.
Richmann 153, 280.
Richtungsnadel 193.
Rieß 309.
Righi 447.
Ritchie 139.
Ritter 329.
Roebuck 91.
Röhrenkessel 122.
Röntgen 436.
Röntgenstrahlen 437.
Rostpendel 404.
Rotationsmagnetismus 404.
Royal Society 353.
Ruderboot 108.
Rückschlag 283.
Ruhmkorffscher Apparat 429.
Rumford 126, 178.
Rumsey 109.
Rutherford 25.

S.

Sanctorius 9.
Sauerstoff 357.
Saussure 462.
Savery 65.
Scheele 132.
Schelling 382, 417.
Schiffskompaß 247.
Schiffsmagnetismus 248.
Schiffsschraube 115.
Schilling-Canstatt 440.
Schmelzen 39.
Schmelzpunkt und Druck 43.
Schmelzwärme 46.
Schnee 484.

Digitized by Google

Schönbein 308.
Schott 11.
Schreibtelegraph 449.
Schweigger 387.
Schwungrad 92.
Seebeck 145, 148.
Sicherheitslampe 159.
Sicherheitsventil 62.
Sieden 74.
Siemens 398, 411.
Sömmering 439.
Solenoid 391.
Somerset 58.
Specifische Wärme 49.
Spencer 377.
Spitzenwirkung 277.
Stahl 355.
Stefan 157.
Steinheil 445.
Stein der Weisen 346.
Stensen 17.
Stephenson 118 fg.
Stromteilung 402.
Symington 105, 110.
Symmer 276.
Synesios 340.

T.

Tangentenbussole 388.
Telegraphenkabel 446.
Telegraphie 439 fg.
Telephon 448.
Temperatur, kritische 343.
Thales 336.
Theophrastus 251.
Thermoelektrizität 394.
Thermometer 9, 19, 460; elektrisches 309.
Thermosäule 142, 396.
Thermoskop 36.
Thilorier 342.
Thomas von Aquino 348.
Thomson, J. 42.
Thomson, W. 42, 247.
Tralles 35.
Tyndall 44, 148.

U.

Unterkühlung 42.

V.

Valenz 365.
Verdoppler 322.
Verdunstungskälte 77.
Verflüssigung der Gase 341.
Verteilung, elektrische 275, 301.
Verteilungsschieber 93.
Vitruvius 55.
Viviani 14.
Volta 303, 317, 320, 321, 332, 414.
Voltainduktion 406.
Voltasche Säule 325.

W.

Wagnerscher Hammer 394.
Wanderung der Jonen 375.
Wärmeäquivalent, mechanisches 170 fg
Wärmekapazität 49.
Wärmeleitung 152; der Metalle 155; der Flüssigkeiten 156; der Gase 157.
Wärmespektrum 145.
Wärmestrahlung 131.
Wärmetheorie, mechanische 170 fg., 183.
Wall 256, 279, 306.
Wallis 353.
Walsh 311.
Warmwasserheizung 38.
Wasserhebemaschine 60, 65.
Wasserstoff 479.
Wasserzersetzung 329, 361.
Watson 268, 310.
Watt 76, 79 fg., 105.
Weber, W. 238, 241, 388.
Wheatstone 307, 441.
Wheatstonesche Brücke 398.
Wheeler 258.
Widerstandsmessung 399.
Wilcke 48, 275.
Wilde 409.
Wilson 283.
Winckler 263, 273, 306.
Wolf 21, 72.
Wolken 482.
Wroblewski 344.

Z.

Zeigertelegraph 443.
Zeno 55.
Ziegler 81.
Zosimos 340.
Zylinderinduktor 443.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

SEP 10 1934

Digitized by Google

Digitized by Google